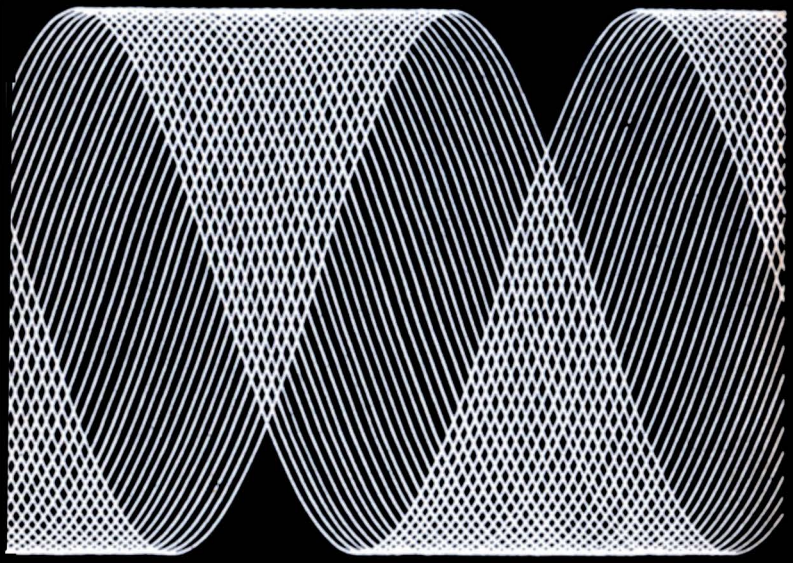
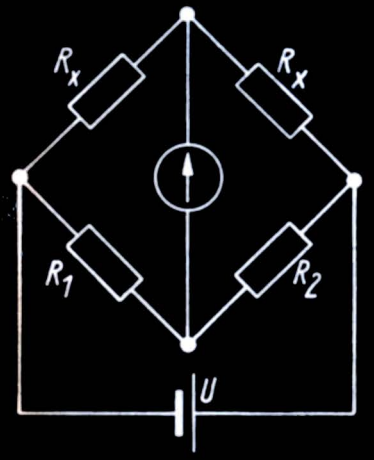
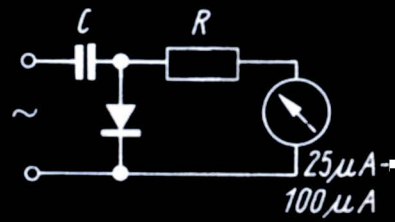
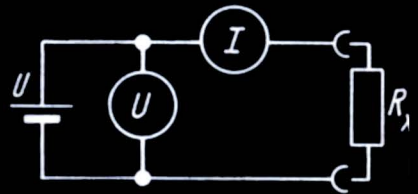
amateurreihe

electronica









Otthermann
Kronjäger

158

Meßtechnik für
Amateure, Teil 1

Leer

electronica · Band 158

OTTHERMANN KRONJÄGER

Meßtechnik für Amateure
Teil 1

MILITÄRVERLAG
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN
REPUBLIK

1. Auflage, 1978, 1.—20. Tausend
© Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) — Berlin, 1978
Cheflektorat Militärliteratur
Lizenz-Nr. 5
LSV: 3539
Zeichnungen: Marion Schilling
Typografie: Helmut Herrmann
Hersteller: Michael Haase
Vorauskorrektor: Ingeborg Kern • Korrektor: Eva Plake
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme Potsdam
Redaktionsschluß: 15. Juni 1977
Bestellnummer: 745 992 7
DDR 1,90 M

Inhalt

Vorwort		6
1.	**Allgemeine Hinweise**	7
1.1.	Messen, Meßfehler und Toleranzen	7
1.2.	Einige Bemerkungen zu Anzeigeinstrumenten	8
1.3.	Welche Messungen gibt es ?	8
1.3.1.	Direkte Messungen	8
1.3.2.	Indirekte Messungen	9
2.	**Überblick zur Funktionsweise einiger Anzeigeinstrumente**	10
2.1.	Drehspulinstrument	10
2.2.	Elektrodynamometer	12
2.3.	Dreheiseninstrument	13
2.4.	Thermoinstrument	13
3.	**Widerstandsmessungen**	15
3.1.	Messung mit dem Ohmmeter	15
3.2.	Messung mit der Brücke	16
3.3.	Weitere Anwendungen der Brücke	18
3.4.	Messung von Widerständen durch Strom und Spannung	19
3.4.1.	R_x ist hochohmig	19
3.4.2.	R_x ist niederohmig	19
3.5.	Messung von Widerständen durch Substitution	20
3.6.	Einige Anwendungsbeispiele	20
3.6.1.	Messung des Innenwiderstands von Anzeigeinstrumenten	20
3.6.2.	Messung von Kontaktwiderständen	21
3.6.3.	Messung des Innenwiderstands von Stromversorgungseinrichtungen	21
3.7.	Widerstandsmessungen bei Wechselstrom	22
3.7.1.	Wirkwiderstandsmessung durch Strom und Spannung	22
3.7.2.	Messung von R_w mit der Brücke	23
3.7.3.	Messung von R_w an Kreisen	24

3.8. Das Antennascop 26
3.9. Wirkwiderstände im Dezimetergebiet 28
4. Messung von Induktivität und Kapazität 29
4.1. Messung von L und C bei niedrigen Frequenzen . 29
4.2. Messung mit der Wechselstrommeßbrücke 30
4.3. Messung von Induktivität und Kapazität an Schwingkreisen 33
4.4. Messung der Eigenkapazität von Spulen und Übertragern 34
4.5. Eigenkapazität von Kurzwellenantennen 35
4.6. Messung von Kapazitäten in der UKW-Technik . 36
4.7. Kapazitätsmessungen bei Elektrolytkondensatoren 36
5. Einige Bemerkungen zur Schein- und Blindwiderstandsmessung 38
6. Anpassungswiderstand 39
6.1. Messung des Anpassungswiderstands am Senderausgang 39
6.2. Anpassungswiderstand von Antennen 40
6.3. Anpassungswiderstände einiger den Amateur interessierender Gerätetypen 41
7. Wellenwiderstandsmessungen 42
8. Messung des Kopplungsfaktors 43
9. Messung an Transformatoren 44
9.1. Orientierende Messungen an Transformatoren ... 44
9.2. Kurzschlußspannung, Leerlaufspannung, Kupfer- und Eisenverluste 44
10. Messung der Induktivität von NF-Drosseln 47
11. Strom- und Spannungsmessungen 48
11.1. Strom- und Spannungsmessungen bei Gleichstrom 48
11.1.1. Spannungsmessungen mit Anzeigeinstrumenten . 48
11.1.2. Spannungsmessung durch Kompensation 48
11.1.3. Messung von Spannungen im Millivoltbereich ... 49
11.2. Strommessungen bei Gleichstrom 50
11.2.1. Messungen mit Anzeigeinstrument 50
11.2.2. Strommessungen durch Spannungsabfall 50
11.3. Spannungsmessungen bei Nieder- und Hochfrequenz 51
11.4. Strommessungen bei Nieder- und Hochfrequenz . 52

12. Einfache Indikatoren 54
13. Leistungsmessung 56
13.1. Leistungsmessung bei Gleichstrom 56
13.2. Leistungsmessung bei Wechselstrom 56
14. Wirkungsgrad 60
15. Spezielle Leistungsmessungen 62
15.1. Leistungsmessung bei SSB 62
15.2. Der Reflektometer 64
16. Phasenwinkelmessung mit dem Oszillografen 66
17. Frequenzmessungen 68
17.1. Zungenfrequenzmesser 68
17.2. Frequenzmeßbrücke nach *Wien-Robinson* 68
17.3. Frequenzmessung nach dem Kondensatorladungsprinzip 69
17.4. Frequenzmessung mit dem Oszillografen 69
17.5. Frequenzmessung mit dem Schwingkreis 72
17.6. Frequenzmessung mit der Meßleitung 73
17.7. Frequenzmessung mit dem Interferenzwellenmesser 73
18. Literaturhinweise 76

Vorwort

Jeder Amateur muß bei seiner praktischen Tätigkeit bestimmte Meßaufgaben durchführen. Deshalb ist auch in der Amateurwerkstatt ein Minimum an Meßmitteln erforderlich. Dabei besteht die Problematik darin, für die meist geringen Meßmittel, die der Amateur im allgemeinen besitzt, geeignete Meßschaltungen anzugeben. Es wird in diesem Band Wert auf den Nachweis einer großen Anzahl von Anordnungen zum Messen wichtiger Grundgrößen gelegt. Meßfehler können nur angedeutet werden; denn Meßfehler kann man nur in unmittelbarem Zusammenhang mit den vorhandenen Meßgeräten erkennen. Details können, wenn erforderlich, aus der Fachliteratur nachgelesen werden. Dem Amateur ist bei der Lösung seiner Aufgaben bereits vielfach mit der relativen Anzeige oder Indikation einer interessierenden Größe geholfen. In Teil 2 werden dann komplexe Meßprobleme erörtert.

Leipzig, im Februar 1974 *Otthermann Kronjäger*

1. Allgemeine Hinweise

In jeder Technik sind Terminologien üblich, so auch in der Meßtechnik. Deshalb ist es zweckmäßig, wenn eingangs einige Definitionen von immer wiederkehrenden Ausdrücken gegeben werden.

1.1. Messen, Meßfehler und Toleranzen

Messen

Unter *Messen* versteht man den Vergleich einer unbekannten Größe mit einer durch ein Gerät gegebenen Größe, wobei das Gerät einen definierten Fehler aufweist.

Meßfehler und Toleranzen

Es wird nicht umfassend auf diese Problematik eingegangen. Hierzu findet der Leser z. B. in [8] einige Erläuterungen. Einige Bemerkungen sind trotzdem angebracht:

Amateure führen kaum Präzisionsmessungen durch. Eine absolut genaue Messung gibt es nicht. Nicht nur die Klasse der Meßgeräte bestimmt den Meßfehler, sondern zusätzlich die Meßschaltung und die Mentalität des Experimentators. Der Meßfehler ist die Differenz zwischen dem abgelesenen Wert und dem tatsächlichen Wert (Soll-Wert). Bezieht man diesen Fehler auf den Soll-Wert, so ergibt sich der relative Fehler. Demnach gilt:

$$p = \frac{\text{Meßanzeige} - \text{Soll-Wert}}{\text{Soll-Wert}} \cdot 100\ ; \qquad (1)$$

p in %.

p wird bei anzeigenden Instrumenten in % des Meßbereichs-

Endwerts angegeben. Man erhält dadurch die Möglichkeit der Klassifizierung. Die Klassen sind z. B.:

0,1 0,2 0,5 1,0 1,5 2,5 5 .

Es heißt beispielsweise 1,0 $\pm$ 1% vom Endwert.

1.2. Einige Bemerkungen zu Anzeigeinstrumenten

Durch das Meßgerät kann der Meßkreis zusätzlich belastet werden. Es könnten sich andere Betriebsbedingungen ergeben, die die tatsächlichen Verhältnisse fälschen. Beispielsweise wirkt sich der Eigenverbrauch des Meßgeräts aus, oder durch zusätzliche Kapazitäten ergeben sich Fehler. In der folgenden Aufstellung ist der Eigenverbrauch einiger Instrumente aufgeführt:

Dreheiseninstrument	0,5...3 **W,**
Elektrodynamisches Instrument etwa	1 W,
Drehspulinstrument	10^{-2} W,
Spiegelgalvanometer	10^{-7} W.

Der innere Widerstand dieser Instrumente wird in Ω/V angegeben. Zum Beispiel bedeuten 1000 Ω/V im 6-V-Bereich, daß das Instrument einen inneren Widerstand von 6000 Ω aufweist. In diesem Zusammenhang soll die Empfindlichkeit der Instrumente genannt werden. Sie ist der Ausschlag in Skalenteilen durch die Meßgröße bei Vollausschlag. Hat man z. B. 50 Skalenteile bei Vollausschlag für 5 mA, so ist die Empfindlichkeit 10 Skalenteile/mA. In [3] findet der Leser einige Angaben, die bei der Handhabung von Anzeigeinstrumenten zu berücksichtigen sind. Dort können auch die auf den Skalen der Instrumente ersichtlichen Kurzzeichen nachgelesen werden.

1.3. Welche Messungen gibt es ?

1.3.1. Direkte Messungen

Gemäß [3] zeigt das Instrument einen Ausschlag, der in un-

mittelbarem Zusammenhang mit der zu messenden Größe steht.

1.3.2. Indirekte Messungen

Der zu messende Wert ergibt sich auf Grund einer bestimmten Meßmethode (Ausschlag- und Vergleichsmethode).

Ausschlagmethode

Man erhält den zu messenden Wert auf Grund von Meßwerten mehrerer Instrumente. Die Genauigkeit ist geringer als die mit einem Instrument, weil sich die Fehler addieren.

Vergleichsmethode

Es wird der Meßwert mit einer bekannten Größe verglichen.

- Ausschlagmethode
  Maximalausschlag — die Genauigkeit sinkt, wenn das Maximum flach verläuft. Eine gewisse Abhilfe ergibt sich durch gleiche Ausschläge vor und nach dem Maximum. Deshalb ist der Meßwert $1/2\ (\alpha_1 + \alpha_2)$, wobei α den Ausschlag kennzeichnet.
- Nullmethode
  Zwischen zwei Punkten eines Meßsystems ergeben sich keine Spannungsunterschiede. Hierbei gehen die Schaltung und die Empfindlichkeit des Instruments in die Meßgenauigkeit ein.
- Anwendung bei Meßbrücken, Kompensationsmethode

Der Spannungsabfall an einem Widerstand ist so groß, wie die Leerlaufspannung einer zweiten Spannungsquelle. In der Zuleitung zu dieser Spannungsquelle liegt ein Strommesser, der bei Gleichheit beider Spannungen keinen Ausschlag hat. Die Empfindlichkeit dieser Methode wird vom Strommesser bestimmt.

2. Überblick zur Funktionsweise einiger Anzeigeinstrumente

Da in den folgenden Abschnitten die Erläuterungen zu den Meßschaltungen mit unterschiedlichen Anzeigeinstrumenten gegeben werden, ist es zweckmäßig, kurz auf ihre Funktionsweise einzugehen.

2.1. Drehspulinstrument

Das Meßwerk besteht aus einem Rähmchen (Aluminium), auf dem Kupferwindungen isoliert aufgewickelt sind. Mit der Anordnung wird zugleich eine Dämpfung der Zeigerbewegung ermöglicht. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Das Rähmchen befindet sich also im Ausschnitt eines Dauermagneten, in dem der Eisenkern angeordnet ist. Dadurch wird der Luftspalt klein gehalten. Fließt Strom durch die Wicklung, so entsteht ein Drehmoment, das am Zeiger erkenntlich ist. Die Stromzuführung zur Wicklung wird über Spiralfedern oder

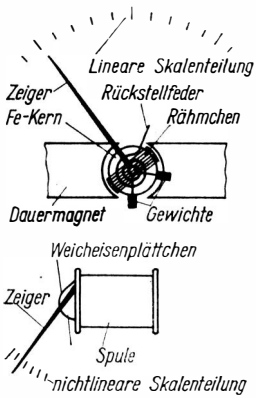


Bild 1 Prinzipielle Funktionsweise von Drehspulinstrument a) und Dreheiseninstrument b)

Spannband vorgenommen. Sie bewirken die Rückstellkraft. Bei Spiralfedern ist das Rähmchen auf Spitzen gelagert. Es ist auch in seiner Ablenkung von der Stromrichtung abhängig. Mit dem Drehspulinstrument läßt sich kein Wechselstrom messen. Instrumente dieses Typs gibt es in vielen Ausführungen. Beispielsweise haben einige Instrumente ihren Nullpunkt in der Mitte der Skale (sie verwendet man hauptsächlich bei Meßbrücken). Je nach Ausführung lassen sich Ströme von 10 μA bis 10 mA ohne Meßbereichserweiterung messen. Die Skale des Drehspulinstruments ist linear geteilt. Um höhere Ströme messen zu können, ist eine Meßbereichserweiterung erforderlich. Das geschieht mit einem Nebenwiderstand, den man dem Meßwerk parallelschaltet. Sein Widerstandswert ist:

$$R_p = \frac{R_i}{\frac{I_{mess}}{I_{in}} - 1}; \qquad (2)$$

R_i — Innenwiderstand des Instruments, I_{in} — Endausschlag des Meßwerks, I_{mes} = zu messender Strom; R_p in Ω, wenn R_i in Ω.

Sollen Spannungen gemessen werden, die höher sind als der Spannungsabfall am Meßwerk bei Vollausschlag, so ist zur Bereichserweiterung ein Vorwiderstand erforderlich. Es ergibt sich:

$$R_v = R_i \left(\frac{U_{mes}}{U_{in}} - 1 \right) \qquad (3)$$

U_{mes} — zu messende Spannung, U_{in} — Spannung am Instrument. An R_p bzw. R_v wird eine entsprechende Leistung verbraucht. Das ist bei der Dimensionierung der Widerstände zu beachten. In der Industrie verwendet man Vielfachmesser. Diese haben umschaltbare Vor- und Parallelwiderstände. Sehr oft sind bei diesen Instrumenten Messungen von Wechselgrößen mit vorgesehen, was durch Gleichrichter möglich wird. Die Skale ist in ihrer Einteilung dann nichtlinear. Man setzt dabei allerdings voraus, daß die Wechselgrößen sinusförmig

sind, weil eine Eichung der Skale in Effektivwerten geschieht. Je nach Qualität eines solchen Instruments lassen sich Messungen bis zu 5 kHz und höher ermöglichen. Obgleich der magnetische Kreis der Meßwerke geschlossen ist, empfiehlt es sich, nicht mehrere Instrumente dicht nebeneinander zu stellen.

2.2. Elektrodynamometer

Bei diesem Instrumententyp gibt es eisenlose und eisengeschlossene Meßwerke. Das eisenlose Instrument setzt man für Präzisionsmessungen ein. Der Aufbau des Meßwerks ist ähnlich dem Drehspulinstrument, es hat jedoch zwei Spulen. Die Spannungsspule ist beweglich, während die Stromspule fest steht. Bei Stromfluß durch die Spulen wird die bewegliche Spule rechtwinklig zu den magnetischen Kraftlinien der festen Spule eingestellt. Dieser Bewegungsvorgang wird mit dem Zeiger kenntlich gemacht. Die Rückstellkraft wirkt über die Spiralfedern. Da in beiden Spulen bei Stromwechsel der Vorgang gleichzeitig stattfindet, kann man das Meßgerät auch bei Wechselstrom verwenden. Das Elektrodynamometer wird als Wattmeter verwendet, wobei die Skale in Watt geeicht ist. Bei Wechselstrom wird die Wirkleistung gemessen. Die Kurvenform des Wechselstroms kann beliebig sein. Es lassen sich Messungen bis etwa 500 Hz durchführen. Bild 2 zeigt, wie man das Wattmeter in den Stromkreis einschaltet.

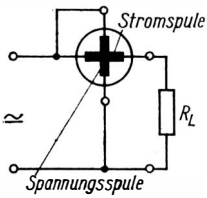


Bild 2
Anschluß des Wattmeters

2.3. Dreheiseninstrument

Dieses Instrument ist robust aufgebaut. Man benutzt es vielfach als Schalttafelinstrument. Das Gerät eignet sich nicht für den Einsatz bei Strömen unter 100 mA und unter 6 V Endausschlag. Zum Prinzip ist zu sagen, daß eine stromdurchflossene Spule das Weicheisenplättchen anzieht, das sich innerhalb der Spule befindet. Daraus ergibt sich die Zeigerbewegung. Bei Gleich- und Wechselstrom tritt der gleiche Effekt auf (bis 100 Hz). Die Skale ist nichtlinear. Gegen Überlastungen ist das Instrument relativ unempfindlich. Der Eigenverbrauch liegt bei 1 bis 3 W. Deshalb kann man keine Messungen an gering belastbaren Spannungsquellen durchführen. Die Zeigerbewegung wird durch besondere Maßnahmen gedämpft, da sonst Pendelbewegungen des Zeigers entstehen würden. Es gibt Präzisionsdreheiseninstrumente, die einen geringen Meßfehler gegenüber den üblichen Instrumenten haben (1,5 bis 3 %).

2.4. Thermoinstrument

Das Instrument besteht aus dem Thermoelement und dem Anzeigegerät, das bei Laborgeräten ein Millivoltmeter ist. Aus Gründen der Anpassung zwischen Thermoelement und Instrument muß es niederohmig sein. Das Element besteht aus zwei geschweißten unterschiedlichen Metallen oder Metallegierungen. Man bezeichnet die Schweißstelle als „heiße Lötstelle". Ein Heizdraht, der sich in äußerster Nähe der Lötstelle befindet, wird im Fall des Meßvorgangs von Wechselstrom beliebiger Kurvenform durchflossen. Die entstehende Wärme überträgt sich auf die Lötstelle. Zwischen der heißen und der kalten Lötstelle (Anschlüsse zum Drehspulinstrument) entsteht eine Thermospannung, die einen Ausschlag am Instrument bewirkt. Man kann die Thermoelemente bis in das UKW-Gebiet verwenden, wobei allerdings Spezialanordnungen des Elements erforderlich sind. Das Thermoelement ist gegen Überlastungen sehr empfindlich. Man muß bei Messungen mit

Thermoinstrumenten sehr vorsichtig arbeiten. Es gibt für die unterschiedlichsten Ströme auch die entsprechenden Elemente. Bei den Funkamateuren hat das Schalttafelinstrument mit Thermoelement zum Messen des Antennenstroms bei Kurzwellensendern große Popularität.

3. Widerstandsmessungen

Elektrische Widerstände sind in allen Stromkreisen vorhanden. In diesem Abschnitt sollen nun Meßmethoden vorgestellt werden, die man in Gleich- und Wechselstromkreisen anwendet. Einschränkend wird zunächst vorausgesetzt, daß bei letzteren Kreisen der Skineffekt noch nicht spürbar vorhanden ist. Später werden Messungen an Wirkwiderständen (Skineffekt) erörtert. Dabei ergeben sich auch Betrachtungen bei Schwingkreisen und Antennen. Jedoch einleitend zum Gleichstromwiderstand folgendes. Es muß beachtet werden, ob:

— die Zuleitung zum unbekannten Widerstand R_x das Meßergebnis verändern könnte;
— eine Parallel- oder Serienschaltung anderer Widerstände in die Messung zu R_x eingeht.

3.1. Messung mit dem Ohmmeter

Bild 3 zeigt die Schaltung des Reihenohmmeters. Danach sind das Anzeigeinstrument und die Widerstände zur Bereichsumschaltung vorhanden. Der Bau eines derartigen Geräts ist ohne Schwierigkeit von jedem Amateur durchzuführen. Man erkennt aus der Schaltung, daß die Batteriespannung gemessen wird. Je empfindlicher das Drehspulinstrument ist, um

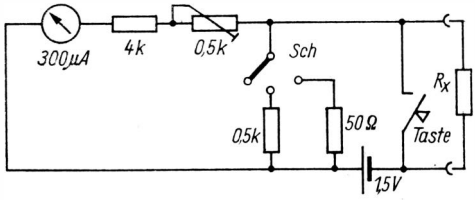


Bild 3 Reihenohmmeter

so hochohmigere Widerstände lassen sich messen. Zur Eichung drückt man die Prüftaste. Die Widerstände 50 Ω und 500 Ω gestatten eine Bereichsumschaltung (1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ). Sollen Widerstände in MΩ-Größe gemessen werden, so muß man mit höherer Batteriespannung arbeiten. Widerstände in 1000-MΩ-Größe wurden in der Vergangenheit mit dem Induktor als Spannungsquelle gemessen. Heutzutage verwendet man einen Transverter, der mit einem entsprechenden Transformator und anschließender Gleichrichtung die Spannung erzeugt. Natürlich sind noch eine Reihe anderer Bedingungen zu erfüllen, auf die aber nicht näher eingegangen wird. Beim bereits beschriebenen Ohmmeter ist noch zu erwähnen, daß die Skale keine lineare Einteilung hat. Der Meßfehler setzt sich aus dem Instrumentenfehler und der Bereichswiderstandstoleranz zusammen. Jedoch ist die Genauigkeit für die Belange des Amateurs völlig ausreichend. Die Popularität dieses Geräts liegt unter anderem auch in seiner Handlichkeit begründet. Besonders für Servicezwecke ist es gut geeignet.

3.2. Messung mit der Brücke

Unabhängig von der Batteriespannung kann R_x mit der *Wheatston*schen Brücke gemessen werden. In Bild 4 ist das Prinzip der Brücke dargestellt. Das Verfahren wird in Abwandlungen auch bei Wechselstrom verwendet. Im Bild ist das Instrument zu erkennen, das sich zwischen den Anschlüssen der Diagonale

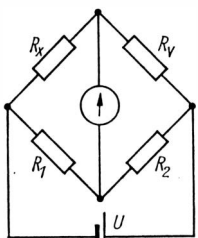


Bild 4
*Wheatston*sche Brücke

der Widerstände R_x — R_v und R_1 — R_2 befindet. Die Abgleichbedingung für R_x lautet:

$$R_x = R_v \frac{R_1}{R_2}. \tag{4}$$

Physikalisch bedeutet es, daß kein Spannungsunterschied im Diagonalzweig vorhanden ist. Da man nicht weiß, ob der Widerstand R_x einen größeren oder einen kleineren Wert hat als der Vergleichswiderstand R_v, sollte für den Abgleich ein Instrument mit Nullstellung in der Mitte der Skale verwendet werden. Je empfindlicher das Instrument ist, um so genauer kann R_x gemessen werden. Während des Meßvorgangs wird das Verhältnis von R_1 — R_2 so lange verändert, bis das Brükkengleichgewicht hergestellt ist. Diese Widerstände sind als Potentiometer oder Schleifdraht ausgebildet. Bei Nullanzeige gibt die Skale des Drehknopfes vom Potentiometer den Wert von R_x an. Mit R_v ist die Bereichsänderung möglich. Die besten Meßergebnisse erzielt man bei Gleichheit aller Widerstände. Das Verhältnis der Widerstände soll nicht mehr als 1:4 bzw. 4:1 betragen. Es wird eine Meßgenauigkeit von 1% erreicht. Mit diesem Prinzip kann man Widerstände von 0,1 Ω bis 50 kΩ messen. Präzisionsmeßbrücken haben Spiegelgalvanometer als Nullindikator, wobei die Genauigkeit der Messung von R_x steigt. Infolge der Empfindlichkeit des Galvanometers wird zunächst ein Grobabgleich vorgenommen. Beim Feinabgleich ist dann der Nebenschluß zum Instrument zu beseitigen. An Stelle des Nullinstruments läßt sich z. B. auch ein magisches Auge verwenden (*Funkamateur*, Heft 3, 1968).

Es wurde bereits erwähnt, daß sich R_1 — R_2 durch einen Schleifdraht ersetzen läßt. Er hat oft die Länge von 1 m und ist ein kalibrierter Widerstandsdraht. In diesem Fall gilt für die Abgleichbedingung: $R_x = R_v (l_1/l_2)$, $(l = l_1 + l_2)$. Es muß darauf geachtet werden, daß durch die anliegende Batteriespannung keine Erwärmung der Widerstände stattfindet.
Sollen Widerstände kleiner als 0,1 Ω gemessen werden, so verwendet man die *Thomson*-Brücke (Bild 5). Das Wesentliche

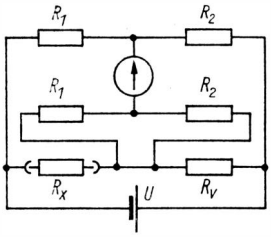


Bild 5
Thomson-Brücke

zur Funktion der Brücke besteht darin, daß die Zuleitung zu R_x nicht eingeht. Es gilt hier zum Abgleich:

$$R_x = R_v \frac{R_1'}{R_2'}. \tag{5}$$

Die Messung besteht darin, indem ein Vergleich des Spannungsabfalls von R_x und R_v vorgenommen wird. Die Widerstände R_1, R_1', R_2', R_2 sind gegen R_x und R_v hochohmig. Dadurch wird der Einfluß der Zuleitungswiderstände gering. Infolge des niederohmigen R_x (10^{-6} Ω bis 1 Ω) ist der Strom durch ihn relativ hoch. Die Genauigkeit der Messung liegt bei 0,5%.

3.3. Weitere Anwendungen der Brücke

Auch für Amateure läßt sich die *Wheatstone*sche Brücke sowohl in der Schaltungs- als auch in der Meßtechnik universell einsetzen. Eicht man beispielsweise das Nullinstrument in Temperaturgraden, so kann man von zentraler Stelle aus an beliebigen Stellen die Temperaturverhältnisse überwachen. In diesem Fall wäre R_x ein Thermistor oder die Wicklung von Kupferdrähten, die als Sonden ausgeführt sind. Des weiteren ist das Antennenascop für die Messung von Antennenanpassungswiderständen ein Begriff für die Funkamateure. In Verbindung mit aktiven Elementen (z. B. einem Transistor) kann man sehr empfindliche Voltmeter herstellen. Auf diese Einsatzmöglichkeiten wird später noch eingegangen.

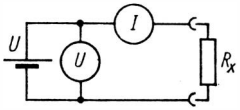


Bild 6
R_x ist hochohmig

3.4. Messung von Widerständen durch Strom und Spannung

Da man bei diesen Messungen teilweise mehrere Instrumente verwendet, ist ihr Eigenverbrauch bei der Messung zu beachten. Es könnte sonst der Widerstand R_x mit einem falschen Wert gemessen werden.
Es sollen nun zwei Meßschaltungen behandelt werden, die für hoch- und niederohmige Widerstände R_x Verwendung finden.

3.4.1. Rx ist hochohmig

Bild 6 zeigt, daß der Spannungsmesser parallel der Spannungsquelle geschaltet ist. Der Strommesser liegt direkt in der Zuleitung für R_x. Demnach wird ein erhöhter Spannungsabfall gemessen. Es besteht die Forderung, den Innenwiderstand des Strommessers gegenüber R_x sehr klein werden zu lassen. Für diese Messung sollte man deshalb $R_i/R_x \leqq 10^{-3}$ voraussetzen.

3.4.2. Rx ist niederohmig

Nach Bild 7 liegt der Spannungsmesser parallel R_x. Der Strommesser mißt die Ströme durch R_x und R_i. Also wird der Strom etwas höher angezeigt, als er für R_x allein wäre. Aus diesem Grunde ergeben sich ähnliche Forderungen für das Verhältnis von R_i des Spannungsmessers und R_x. Es gilt deshalb $R_i/R_x \geqq 10^3$. Bei beiden Verfahren kann man mit einem Fehler von einigen Prozenten rechnen.

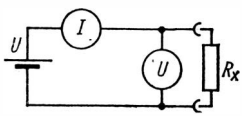


Bild 7
R_x ist niederohmig

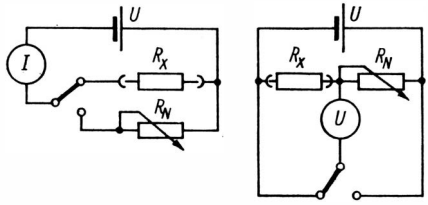


Bild 8 Substitutionsmethode

3.5. Messung von Widerständen durch Substitution

Bild 8 zeigt dafür zwei Meßmöglichkeiten. Entsprechend dem linken Teil des Bildes wird R_x mit einem veränderlichen Widerstand R_N verglichen. Ist sowohl der Strom durch R_x als auch nach Umschaltung durch R_N gleich, so hat man den Wert von R_x ermittelt. Das Instrument muß also mit einer R_N-Skale versehen sein, auf der man dann den Widerstandswert ablesen kann. Entsprechend dem rechten Teil des Bildes werden die Spannungsabfälle von R_x und R_N verglichen. Der Meßbereich zur Messung von R_x ist relativ gering.

3.6. Einige Anwendungsbeispiele

Mit einigen Beispielen soll die Verfahrensweise weiterer Widerstandsmessungen erläutert werden.

3.6.1. Messung des Innenwiderstands von Anzeigeinstrumenten

Sehr oft ist nicht bekannt, welchen Innenwiderstand das Instrument hat. Nachfolgend wird beschrieben, wie man den

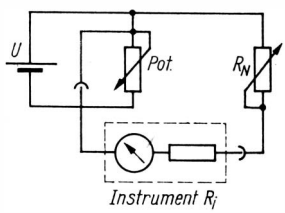


Bild 9
Innenwiderstand von Instrumenten

Innenwiderstand ermitteln kann (Bild 9). Man schließe das Instrument an einen niederohmigen Spannungsteiler und beginne von 0 V an die Spannung langsam aufwärtszuregeln, bis Vollausschlag am Instrument vorhanden ist. Danach wird ein veränderlicher Widerstand in Reihe mit dem Instrument geschaltet. Dieser ist so weit zu regeln, bis am Instrument der halbe Ausschlag eintritt. Dabei muß der Spannungsteilerwiderstand vernachlässigbar gegenüber dem R_i des Instruments sein. Gemäß dem halben Ausschlag muß sich dann für $R_i = R_N$ ergeben.

3.6.2. Messung von Kontaktwiderständen

Das Verfahren besteht darin, einen konstanten Strom durch R_x zu leiten (Kontaktwiderstand). Der Strom darf R_x nicht erwärmen. Die Höhe des Stromes richtet sich nach dem Spannungsabfall über den Kontaktwiderstand. Demnach muß der Spannungsmesser, mit dem man den Spannungsabfall über R_x mißt, die geeignete Empfindlichkeit haben. Die Zuleitung zum Spannungsmesser darf nicht in die Meßgenauigkeit eingehen. Beide Bedingungen (Empfindlichkeit und Hochohmigkeit) erfüllen RV. Man kann auch mit Wechselstrom arbeiten. Dabei sind relativ unproblematische Verstärkungen möglich.

3.6.3. Messung des Innenwiderstands von Stromversorgungseinrichtungen

Einschränkend sei erwähnt, daß es sich um Batterien und Generatoren handelt, deren Leistung gering ist. Man mißt zunächst die Leerlaufspannung U_l. Dabei muß der Innenwiderstand sehr hochohmig gegenüber dem des Meßobjekts sein. Man würde sonst nicht die Leerlaufspannung, sondern bereits die Klemmenspannung messen. Nach diesem Meßvorgang wird die Belastung durch den Lastwiderstand R_L vorgenommen. Dieser muß einen entsprechenden Wert haben, damit der Spannungsabfall über R_L $U_L = U_l/2$ wird. R_L ist dann gleich dem Innenwiderstand des Meßobjekts.

Dieses Verfahren läßt sich nicht mehr anwenden, wenn durch diese Messung eine dauernde Schädigung des Prüflings eintreten würde.

3.7. Widerstandsmessungen bei Wechselstrom

Leitet man durch einen Schichtwiderstand einen Strom mit der Frequenz von 50 Hz, so werden sich die anliegende Spannung und der fließende Strom nach dem *Ohm*schen Gesetz verhalten. Schaltet man den gleichen Widerstand in einen Stromkreis mit f = 100 MHz, so stellt man andere Abhängigkeiten von Strom und Spannung fest. Hier könnte sich z. B. die Kappenkapazität mit bemerkbar machen, wodurch ein anderer Widerstand wirksam würde. Legt man jedoch einen Drahtwiderstand in einen Stromkreis mit f = 1 kHz, dann wird eine induktive Komponente bereits am Gesamtwiderstand beteiligt sein. Daran läßt sich erkennen, daß es nicht gleichgültig ist, bei welcher Frequenz der Widerstand im Kreis mitwirkt. Widerstände, deren Werte bei Phasengleichheit von Strom und Spannung durch die Frequenz f nicht verändert werden, nennt man *Wirkwiderstände* (R_w). Bekanntlich erhöht sich der Widerstand von Leitern mit steigender Frequenz infolge der Hautwirkung (Skineffekt). Weil zwischen Strom und Spannung am Wirkwiderstand der Phasenwinkel $\varphi = 0$ ist, hat dieser ohmsche Eigenschaften. Aus diesem Grunde ist die an R_w verbrauchte Leistung die Wirkleistung.

3.7.1. Wirkwiderstandsmessung durch Strom und Spannung

Man kann das Verfahren nach Abschnitt 3.4. anwenden. Allerdings sind noch einige zusätzliche Bedingungen zu erfüllen. Es sei von der allgemeinen Schaltung (Bild 10) ausgegangen. Wie bereits erklärt, kann je nach der Betriebsfrequenz außer dem ohmschen Anteil noch eine induktive oder kapazitive Komponente am Meßergebnis beteiligt sein. Es sind weitere Anforderungen an die Meßinstrumente zu stellen. Nur bei sinusförmigem Wechselstrom lassen sich in Effektivwerten

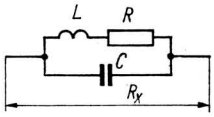


Bild 10
Der technische Widerstand

geeichte Instrumente verwenden. Sind die Meßgrößen verzerrt, so kann man beispielsweise Thermoinstrumente benutzen. Die Bedingungen für den Innenwiderstand der Instrumente sind zu erweitern, indem bei der Meßfrequenz z. B. keine kapazitive Komponente mitwirken darf. Nach diesen vorbereitenden Hinweisen wird für den Betrag des Widerstands R_x von seinem möglichen Scheinwiderstand ausgegangen:

$$R_x = R_{schei} = \sqrt{R_w^2 + R_b^2}\,. \tag{6}$$

In dieser Beziehung wird der Blindwiderstand R_b um so eher wirksam, je höher die Frequenz ist. Der Realteil des in Bild 10 gezeigten technischen Widerstands ist:

$$R_w = \frac{R}{(1 - \omega^2\,LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2}\,. \tag{7}$$

Der Imaginärteil des Widerstands ergibt sich zu:

$$R_b = \frac{\omega L\,(1 - \omega^2 LC) - \omega\,CR^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R^2}\,. \tag{8}$$

Der Phasenwinkel beträgt:

$$\tan\varphi = \omega CR = \frac{\omega L}{R}\,(1 - \omega^2 LC) - \omega CR\,. \tag{9}$$

In der Amateurtechnik kann man für eine Reihe von Anwendungen zur Ermittlung von R_w bei niedrigen Frequenzen (50 bis 100 Hz) $R_{schein} = R_w$ setzen.

3.7.2. Messung von Rw mit der Brücke

Wenig problematisch ist die Messung von R_w, wenn man dazu eine Brücke nach Bild 4 verwendet. Es muß allerdings voraus-

gesetzt werden, daß bei der Betriebsfrequenz (Speisung der Brücke) die Blindkomponenten des Widerstands zu vernachlässigen sind. Der Nullindikator kann im einfachsten Fall ein Gleichrichterinstrument oder Kopfhörer sein. Den Kopfhörer verwendet man oft bis zu Frequenzen von 1 kHz.

3.7.3. Messung von R_w an Kreisen

Der Verlustwiderstand von Schwingkreisen ist ein Wirkwiderstand. Ihn kann man durch Brandbreitenmessung ermitteln [10]. Bei dieser Meßmethode muß vorausgesetzt werden, daß die Güte des Kreises bei der Meßfrequenz eine ausreichende Höhe aufweist. (Deshalb kann der unbekannte Wirkwiderstand R_{wx} nur so hoch sein, daß sich noch Resonanzüberhöhung messen läßt). Gemäß Bild 11 werden zwei Verfahren angegeben. Im Fall der Ankopplung eines Serienkreises an einen Generator mit dem Innenwiderstand R_i darf R_i die Meßmöglichkeiten nicht einschränken. Durch Bandbreitenmessung ergibt sich für den Verlustwiderstand des Kreises:

$$R_w = 12{,}56\, \Delta f \cdot L = R_L + R_C\,; \qquad (11)$$

R_w in Ω, L in H, Δf in Hz (Bandbreite), R_C und R_L sind die Verlustwiderstände von C und L.
Sehr oft ist $R_w \approx R_L$, weil $R_C \ll R_L$. Legt man jetzt R_{wx} in den Kreis, so ergibt sich eine höhere Bandbreite, und demnach hat man jetzt den Verlustwiderstand R'_w. Also wäre $R_{wx} \approx R'_w - R_w$. Für genügende Resonanzüberhöhung beim Meßvorgang sollte R_{wx} nicht höher als $5R_w$ sein. Mit der in Bild 11

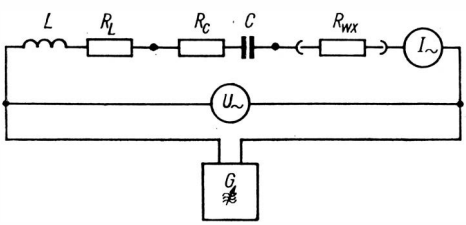


Bild 11 Serienschwingkreis

gezeigten Resonanzbrücke kann man ebenfalls R_{wx} messen. Dazu stimmt man den Kreis zunächst ohne R_{wx} auf die Meßfrequenz ab und stellt dann das Widerstandsgleichgewicht der Brücke her. Am Indikator ist demnach ein Minimum der Spannung vorhanden. Nun legt man R_{wx} in den Zweig des Kreises und stimmt diesen nach. Infolge R_{wx} muß mit R_v die Brücke nachgestimmt werden. Für R_{wx} ist dann:

$$R_{wx} = R_v \frac{R_1}{R_2}. \tag{12}$$

Auch hier darf R_{wx} nicht so hoch sein, daß der Kreis keine Resonanzüberhöhung mehr hat. Es ist auch möglich, R_{wx} am Parallelschwingkreis zu messen (Bild 12). Nur muß man vor der Messung abschätzen, ob der Widerstand hoch- oder niederohmig sein wird. Im letzteren Fall schalte man ihn in die Leitung der Induktivität. Es wird wiederum die Bandbreitenmessung angewendet. Sowohl der Generator als auch das Anzeigegerät sind lose an den Kreis zu koppeln. Das Anzeigegerät kann ein Voltmeter sein, das mit Röhren oder mit Transitoren aufgebaut ist.

Im folgenden wird dieses Anzeigegerät mit RV bezeichnet. Durch das Messen mit und ohne R_{wx} ergibt sich schließlich eine Aussage zur Güte Q des Kreises. Daraus läßt sich der Resonanzwiderstand des Parallelschwingkreises R_p bestimmen (er ist auch ein Wirkwiderstand). In R_p vereinigen sich die Verlustwiderstände von L und C. Für R_p erhält man:

$$R_p = R_b \cdot \frac{f_{res}}{\Delta f} = 6{,}28 \cdot L \frac{f_{res}^2}{\Delta f} = \frac{0{,}159}{f \cdot C}; \tag{13}$$

R_p in Ω, wenn R_b in Ω (Blindwiderstand von L oder C), Δf in Hz, C in F, L in H.

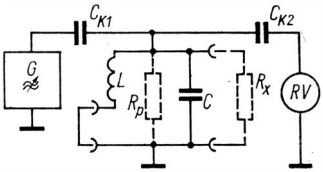


Bild 12
Parallelschwingkreis

Aus Gründen der Verlustfreiheit ist es zweckmäßig, bei Hochfrequenz einen Luftdrehkondensator zu verwenden. Diesen kann man eichen. Es ist dann die Kapazitätsdifferenz ΔC zu benutzen, die sich aus den Kapazitätswerten für die Bandbreitenfrequenzen f_o und f_u ermitteln läßt. Es ist dann:

$$R_p = \frac{0{,}159}{\Delta C \cdot f_{res}}; \tag{14}$$

R_p in Ω, C ind F, f in Hz.
Weil man für die meisten Meßbedingungen voraussetzen kann, daß $R_C \ll R_L$ ist, ergibt sich mit der Transformation von R_L in R_p und umgekehrt aus R_p der Widerstand R_L in:

$$R_L = \frac{(\omega L)^2}{R_p}; \tag{15}$$

R in Ω, L in H, f in Hz.
Aus dieser Beziehung geht hervor, daß man beim Parallelschwingkreis auch niederohmige R_{wx} verwendet, wenn diese in Reihe mit der Induktivität geschaltet werden, da sich dann ebenfalls Resonanz feststellen läßt.
Im folgenden wird nun die Parallelschaltung von R_{wx} zum Kreis behandelt. Man stimmt den Kreis erneut ab und ermittelt wieder die Bandbreite. Es ergibt sich der neue Widerstand R_p'.
Jetzt kann man R_{wx} bestimmen. Denn es ist:

$$R_{wx} = \frac{R_p \cdot R_p'}{R_p - R_p'}. \tag{16}$$

Von der Industrie werden einige Meßgeräte angeboten, z. B. der Gütefaktormesser. Der Amateur wird aber seine Meßaufgaben mit eigenen Mitteln lösen.

3.8. Das Antennascop

Dieses Gerät (Bild 13) benutzt man zum Messen von Wirkwiderständen in Antennenkreisen. Mit R_3 gleicht man die

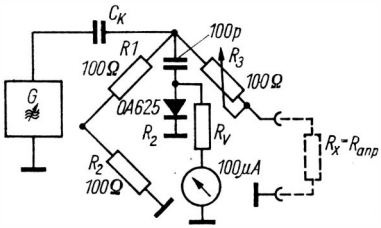


Bild 13
Antennascop

Brücke ab. Als Anzeigeinstrument wird ein Mikroamperemeter (25 μA bis 100 μA) verwendet. R_3 richtet sich nach dem zu erwartenden Widerstand R_x. Im allgemeinen werden Strahlungswiderstände bis 100 Ω auftreten. Deshalb reicht ein Schichtdrehwiderstand von 100 Ω aus.

Für die anderen Widerstände der Brücke werden ebenfalls 100 Ω vorgesehen; es müssen reine Schichtwiderstände sein. Die Ausgangsspannung des HF-Generators läßt sich regeln, wobei zu Beginn der Messung ein gut sichtbarer Ausschlag am Instrument vorhanden sein muß. Bei geeignetem Aufbau der Brücke (ohne schädliche Kapazitäten) kann man Messungen mindestens bis 30 MHz durchführen. Der Strahlungswiderstand der Antenne läßt sich nur dann messen, wenn die Antenne in Resonanz mit der Generatorfrequenz ist und der gesamte Verlustwiderstand der Antennenanlage vernachlässigt werden kann. Diese Bedingung wird aber in den meisten Fällen nicht erfüllt. Die Brücke eicht man mit bekannten Schichtwiderständen. Bild 14 zeigt die Meßschaltung.

Den abgestimmten Zustand der Antenne erreicht man durch den Abgleich der Antennenelemente auf die Generatorfrequenz, oder es wird die Generatorfrequenz so lange variiert, bis die Antenne in Resonanz mit der Generatorfrequenz ist.

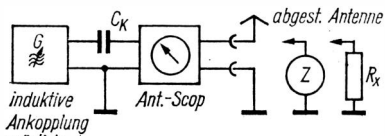


Bild 14
Meßschaltung

In beiden Fällen erhält man dann am Eingang der Antennenanlage den Anpassungswiderstand R_{anp}. Also ist der Widerstand $R_x = R_{anp}$ zu messen. Im einzelnen ergibt sich:

$$R_x = R_{ver} + R_S \,, \tag{25}$$

$$R_{ver} = R_{abs} + R_{ant} + R_E \,; \tag{26}$$

R_{ver} — gesamter Verlustwiderstand der Antennenanlage,
R_{abs} — Verlustwiderstand der Abstimmittel des Antennenkreises,
R_{ant} — Verlustwiderstand des Strahlers, R_S — Strahlungswiderstand (einziger Nutzwiderstand).
Alle Widerstände sind Wirkwiderstände. Die Meßgenauigkeit steigt mit der Verringerung von R_{abs}, d. h., beste Meßergebnisse kann man bei in Eigenresonanz befindlichen Antennen erwarten.

3.9. Wirkwiderstände im Dezimetergebiet

Die Meßleitung kann man zum Messen von Wirkwiderständen vom 2-m- bis zum 70-cm-Band verwenden. In [10] findet der Leser dazu einige Hinweise.

4. Messung von Induktivität und Kapazität

Beide Bauelemente sind für Wechselstrombetrieb als Blindwiderstände anzusehen. Es wird auch in diesem Fall bei den Messungen davon ausgegangen, daß sich diese mit den Mitteln des Amateurs prinzipiell durchführen lassen.

4.1. Messung von L und C bei niedrigen Frequenzen

Bild 15 zeigt die einfache Meßschaltung. Man verwendet einen Transformator mit Anzapfung oder, noch besser, einen Regeltransformator. Es ist zweckmäßig, die Messungen mit geringen Spannungen durchzuführen. Die Betrachtungen gelten zunächst bei der Frequenz von 50 Hz. Als Meßmittel eignen sich Drehspulinstrumente mit Gleichrichter, Thermoinstrumente oder RV. Obwohl man durch die äußeren Abmessungen bei Kondensatoren überschlägig auf die Höhe der zu erwartenden Kapazität schließen kann, wird es zweckmäßig sein, die Messung mit der Spannung 0 zu beginnen, weil nicht bekannt ist, ob der Kondensator einen Defekt aufweist. Die Höhe der dann folgenden Meßspannung hängt noch von der Empfindlichkeit des Strommessers bzw. vom Kapazitätswert überhaupt ab. Elektrolytkondensatoren lassen sich auf diese einfache Weise nicht messen. Der Blindwiderstand des Kondensators wird also dann gemessen, wenn man voraussetzen kann, daß die

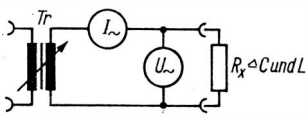


Bild 15
Blindwiderstand (L und C) bei niedrigen Frequenzen

Verluste zu vernachlässigen sind. Für die unbekannte Kapazität erhält man mit guter Näherung (50 Hz):

$$C_x = 0{,}318 \cdot 10^{-2} \frac{I}{U}; \tag{19}$$

C in F, U in V, I in A.

Der Strom wird mit durch den Innenwiderstand des Transformators bestimmt. Aus diesem Grund muß der Innenwiderstand wesentlich niederohmiger als der Blindwiderstand des Kondensators sein.

Die Genauigkeit der Messung wird von den Fehlern der Instrumente, der Vernachlässigung des Verlustwiderstands und des Innenwiderstands der Stromquelle bestimmt. Bei Induktivitätsmessungen sollte man vorher auch die zu erwartende Induktivitätsgröße bedenken. Bei relativ großen Induktivitäten wird ihr Verlustwiderstand nicht mehr zu vernachlässigen sein. Man mißt dann den Scheinwiderstand des Prüflings. Die Messung ist deshalb bei Vernachlässigung des Verlustwiderstands als Näherung zu werten. Des weiteren muß gerade bei Induktivitäten, durch die ein Betriebsgleichstrom fließt und die eine hohe Induktivität haben, beachtet werden, daß infolge der Vormagnetisierung die Induktivität geringere Werte hat. Die Induktivität ist bei der Frequenz von 50 Hz:

$$L \approx 0{,}318 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{U}{I}; \tag{20}$$

L in H, U in V, I in A.

Werden höhere Meßfrequenzen eingesetzt, so kann man Kapazitäten und Induktivitäten geringerer Werte messen.

4.2. Messung mit der Wechselstrommeßbrücke

Die Grundschaltung ergibt sich aus Bild 16. Für die Abgleichbedingungen der komplexen Widerstände gilt:

$$\frac{\underline{\mathfrak{R}}_1}{\underline{\mathfrak{R}}_2} = \frac{\underline{\mathfrak{R}}_3}{\underline{\mathfrak{R}}_4}. \tag{21}$$

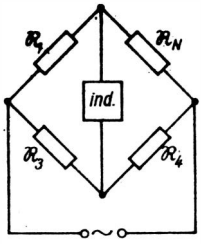


Bild 16
Wechselstrombrücke

Im Gegensatz zur Gleichstrombrücke müssen besonders bei verlustbehafteten Kondensatoren und Spulen Abgleichmöglichkeiten für den Blind- und den Verlustwiderstand vorhanden sein. Dazu gibt es eine Reihe von Brücken, von denen nachstehend einige genannt werden.

Die Brücke nach *Maxwell-Wien* ist frequenzunabhängig, d. h., die Abgleichbedingungen sind bei unterschiedlichen Frequenzen die gleichen. Mit guter Näherung gilt das auch bei etwas verzerrter Wechselspannung als Speisespannung. Mit der genannten Brücke lassen sich vornehmlich Induktivitäten messen (Bild 17). Die Abgleichbedingungen sind:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_C}, \; L_x = R_1 \cdot R_2 \cdot C\,. \tag{22}$$

Infolge schädlicher Kapazitäten (die sich mit höherer Frequenz mehr auswirken) sind der Frequenzunabhängigkeit der Brücke Grenzen gesetzt. Der Abgleich wird am besten mit R_C

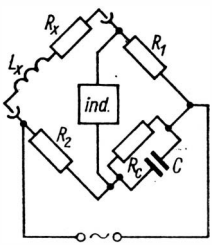


Bild 17
Brücke nach *Maxwell-Wien*

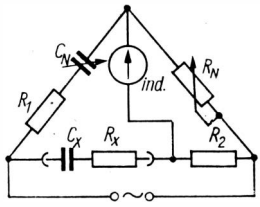


Bild 18
Wien-Brücke

und C vorgenommen, durch diese kann man auch Bereichsumschaltungen durchführen. Das veränderliche C ist durch abschaltbare Parallelkondensatoren und einen Drehkondensator gut zu lösen.
Bild 18 zeigt die *Wien*-Brücke. Als Nullindikator benutzt man den Kopfhörer. Als Meßfrequenz werden 800 Hz verwendet. Als Indikator eignet sich auch der Oszillograf. Die Abgleichbedingungen für den unbekannten Kondensator C_x und dessen Verlustwiderstand R_x sind:

$$C_x = C_N \frac{R_N}{R_2}, R_x = R_1 \frac{R_2}{R_N} \tag{23}$$

($\tan \delta = R_1 \omega C_N$);
C in F, R in Ω, f in Hz.
C_N und R_N kann man mit Skalen versehen. Ebenso lassen sich die Bereiche damit umschalten. Die Genauigkeit liegt für Amateurbelange bei 3%. Eine für Amateure sehr handliche

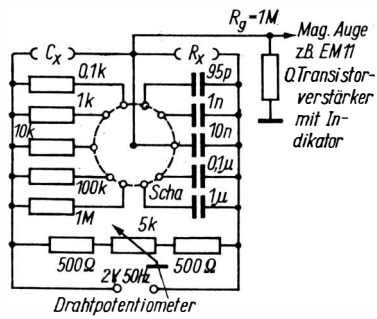


Bild 19
Einfache Brücke zur Messung von R und C. Als Indikator ist ein magisches Auge vorgesehen

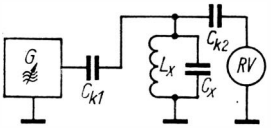


Bild 20
Messung von L und C bei Hochfrequenz

Brücke (Bild 19) arbeitet mit dem magischen Auge als Nullindikator. Es können C_x und Wirkwiderstände R_x gemessen werden. Die Genauigkeit ist mit 5% für gute Informationsmessungen ausreichend.

4.3. Messung von Induktivität und Kapazität an Schwingkreisen

Dieses Verfahren kann man hauptsächlich bei Hochfrequenz anwenden. Dazu benutzt man einen Schwingkreis, der auf die gewünschte Generatorfrequenz abgestimmt wird. Wie Bild 20 erkennen läßt, benötigt man zur Anzeige neben dem HF-Generator noch ein RV. Sowohl den Generator als auch das RV koppelt man sehr lose an den Kreis. Ist das Schwingkreis-L bekannt, so ergibt sich für C_x:

$$C_x = \frac{25{,}3 \cdot 10^{-2}}{f^2 \cdot L}. \tag{24}$$

Kennt man die Schwingkreiskapazität, dann ergibt sich analog:

$$L_x = \frac{25{,}3 \cdot 10^{-2}}{f^2 \cdot C}; \tag{25}$$

C in F, L in H, f in Hz.
Vergleicht man die Schaltung nach Bild 12 mit der entsprechend Bild 20, so ergeben sich im Meßverfahren prinzipiell keine Unterschiede. Jedoch wurde im ersten Fall R_x bestimmt, während nun die Schwingkreiselemente L oder C zu ermitteln sind. Des weiteren wird bei dieser Messung Hochfrequenz vorausgesetzt. Ein für den Funkamateur geeignetes Verfahren zur Messung der Resonanzfrequenz von Kreisen — und damit

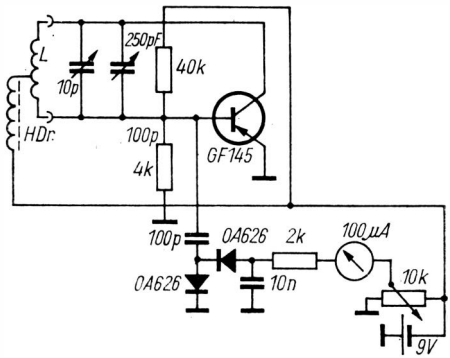


Bild 21 Grid-Dip-Meter mit einem Transistor

auch zur Bestimmung von C_x oder L_x — ist durch das Grid-Dip-Meter gegeben. Obwohl in Teil 2 ein transistorisiertes Dip-Meter ausführlich beschrieben wird, sei in Bild 21 das Meßprinzip angedeutet. Es soll angenommen werden, daß es sich z. B. um einen Oszillator in Dreipunktschaltung handelt. Die Schwingkreisspule ist für die Bereiche als Steckspule ausgeführt. Diese koppelt man induktiv an das Meßobjekt an.

Bei Energieentzug ist infolge Arbeitspunktänderung ein sogenannter Dip am Instrument zu erkennen. Damit stimmt die Resonanzfrequenz des Prüflings mit der des Oszillators überein. Da nun f bekannt ist, läßt sich bei bekanntem L dann C_x usw. ermitteln. Für das Dip-Meter können Ge- und Si-Transistoren mit f_β = 10mal der Betriebsfrequenz verwendet werden. Die Genauigkeit des Meßergebnisses hängt von der Konstanz der Frequenz und ihrem Absolutwert ab.

4.4. Messung der Eigenkapazität von Spulen und Übertragern

Zum Messen der Eigenkapazität von Spulen läßt sich die Schaltung nach Bild 20 verwenden. Dazu schaltet man der

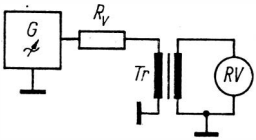


Bild 22
Eigenkapazität von Übertragern

Spule die definierte Kapazität C_1 parallel und mißt die Resonanzfrequenz f_1. Danach wird der Spule die Kapazität C_2 parallelgeschaltet und bei Resonanz die Frequenz f_2 gemessen. Für die Eigenkapazität der Spule ergibt sich deshalb:

$$C_{ei} = \frac{f_1^2 C_1 - f_2^2 C_2}{f_2^2 - f_1^2}\,; \tag{26}$$

C in F, f in Hz.

Will man die Eigenkapazität von Übertragern oder ähnlichem messen, so verwendet man zweckmäßigerweise die Schaltung nach Bild 22. Der Generator wird über einen möglichst hochohmigen Widerstand angekoppelt. Der Spannungsmesser, zur Anzeige der Resonanz, ist ebenfalls möglichst schwach anzukoppeln. Nach diesen Vorbereitungen wird die Frequenz des Generators bis zur Resonanz am Anzeigeinstrument erkenntlich verändert. Bei bekanntem L der Wicklung ist die Eigenkapazität nach Gl. (24) zu berechnen. Man kann das Verfahren nach Gl. (26) mit der dortigen Erklärung ebenfalls anwenden.

4.5. Eigenkapazität von Kurzwellenantennen

Bei der Messung von statischen Kapazitäten an unsymmetrischen Antennen handelt es sich vorwiegend um Kurzwellen-

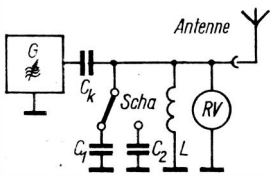


Bild 23
Messung der statischen Kapazität von KW-Antennen

antennen. Dafür benutzt man die Meßschaltung nach Bild 23. Danach wählt man eine definierte Induktivität und zwei umschaltbare Kapazitäten. Mit dem Generator wird die Resonanz des Gebildes bei den Kapazitäten C_1 und C_2 ermittelt. Hierbei ist zu beachten, daß die Frequenzen f_1 und f_2 weit unterhalb der Eigenfrequenz der Antenne liegen. Mit Gl. (26) kann man dann mit guter Näherung die statische Kapazität C_A feststellen. Allerdings ist zu beachten, daß der Antennendraht ebenfalls eine statische Induktivität hat. Deshalb sollten die Frequenzen um hundert Kilohertz liegen. Die dynamische Kapazität ergibt sich dann, wenn auf der Antenne stehende Wellen vorhanden sind. Das geschieht bekanntlich im Resonanzfall der Antenne oder mit zusätzlichen Abstimmitteln. Für C_{dyn} ist dann:

$$C_{dyn} = C_A \cdot \frac{\sin (2\,\pi\, l/\lambda)}{2\pi\, l/\lambda}. \tag{27}$$

4.6. Messung von Kapazitäten in der UKW-Technik

In diesem Fall handelt es sich oft um Kapazitäten, deren Wert 50 pF nicht übersteigt. Diese Aufgabe läßt sich lösen, indem mit der Lecher-Leitung gearbeitet wird. Dazu findet der Leser Erläuterungen in [10].

4.7. Kapazitätsmessungen bei Elektrolytkondensatoren

Kapazitätsmessungen bei diesem Kondensator sind schwierig, weil durch eine Wechselspannung der Kondensator infolge Polaritätsänderung zerstört werden könnte. Man kann dem Problem begegnen, indem mit einer pulsierenden Gleichspannung (z. B. Einweggleichrichtung) gearbeitet wird. Da das Verfahren relativ aufwendig ist, sei der Leser auf [17] verwiesen. Bild 24 zeigt eine Schaltung, mit der man den Reststrom messen kann. Durch Überlagerung einer sehr geringen Wech-

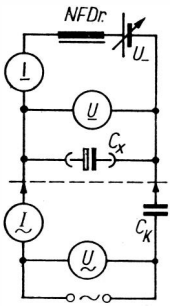


Bild 24
Messung des Leckstroms von Elektrolytkondensatoren

selspannung kann man in kurzer Meßzeit einen Näherungswert der Kapazität ermitteln. Die folgende Aufstellung der Restströme gibt bereits einen Aufschluß, inwieweit der Kondensator noch in Ordnung ist:

bis 15 V Reststrom 0,02 mA/μF,
bis 60 V Reststrom 0,05 mA/μF,
bis 160 V Reststrom 0,1 mA/μF,
bis 300 V Reststrom 0,2 mA/μF.

Zur Schaltung ist zu bemerken, daß man zunächst den Reststrom mißt. Dazu wird die Betriebsspannung gemäß Kennwert angelegt und der Strom gemessen (Achtung, Kurzschluß möglich!). Man regelt deshalb die Spannung langsam hoch. Nach dieser Messung kann man bei anliegender Gleichspannung die Wechselspannung (f = 50 Hz) geringer Amplitude anlegen. Unter Vernachlässigung des Verlustwiderstands ist über

$$R_C = \frac{U}{I} \tag{28}$$

dann

$$C_x = \frac{C_K}{\omega R_C C_K - 1}\ ; \tag{29}$$

R in Ω, C in F, f in Hz.

5. Einige Bemerkungen zur Schein- und Blindwiderstandsmessung

Bei den Messungen der Kapazität bzw. der Induktivität wurde der Schein- oder Blindwiderstand erwähnt. In diesem Abschnitt sollen speziell einige Messungen zu den genannten Widerständen erörtert werden. Muß man nämlich davon ausgehen, daß die Verlustwiderstände dieser Bauelemente (C und L) nicht mehr zu vernachlässigen sind oder daß sich zusätzliche Wirkwiderstände in der Schaltung befinden, so ist es erforderlich, diese in ihrer Größe mitzubestimmen. Diesen Erläuterungen soll die Netzfrequenz zugrunde gelegt werden; sie gelten allerdings auch bei anderen Betriebsfrequenzen. Im Widerstand $\Re$ verkörpert sich der gesamte Scheinwiderstand des Kreises. Man führt die Messung gemäß Bild 25 durch und ermittelt zunächst die Wirkleistung mit dem Wattmeter. Des weiteren stellt man durch eine Strom-Spannungsmessung den Betrag des Scheinwiderstands $R = U/I$ fest. Die Wirkleistung war:

$$P_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi \,. \tag{30}$$

Da die Meßwerte von U und I bekannt sind, kann man leicht $\cos \varphi$ ermitteln. Deshalb ist der gesamte Wirkwiderstand von R:

$$R_w = \frac{U}{I \cdot \cos \varphi} \,. \tag{31}$$

Der Winkel φ wird als Phasenwinkel bezeichnet. Bei Wirkwiderständen ist er beispielsweise 0. In Gl. (6) bis Gl. (10) wird bereits auf die gesamte Problematik eingegangen.

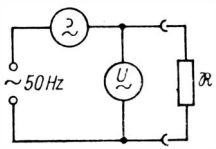


Bild 25
Scheinwiderstandsmessung bei 50 Hz

6. Anpassungswiderstand

Dieser Widerstand hat in der Elektronik große Bedeutung. Man kann allerdings aus vielerlei Gründen keineswegs den Anpassungsbetrieb $R_i = R_{anp}$ in den Techniken betreiben. Dazu findet der Leser in [10] einige Erläuterungen.

6.1. Messung des Anpassungswiderstands am Senderausgang

In Bild 26 ist der Tankkreis einer Senderendstufe dargestellt. Es gilt festzustellen, wenn der Sender auf den richtigen Anpassungswiderstand arbeitet. Man belastet den Ausgang mit unterschiedlichen für die Last dimensionierten Schichtwiderständen und mißt mit einem Thermoinstrument den durch diesen Widerstand fließenden Hochfrequenzstrom. Je nach Betriebsfrequenz kann es notwendig sein, daß die Zuleitung zum Widerstand durch einen Serienschwingkreis im Leitungszug zum Widerstand abgestimmt werden muß. Dieser Kreis muß eine hohe Güte haben. Der Senderkreis muß ebenfalls in Resonanz sein. Ferner ist der Eingangsstrom zur Senderstufe (Anoden- oder Kollektorstrom) zu beobachten. Man hat dann den richtigen Anpassungswiderstand, wenn die höchste Sen-

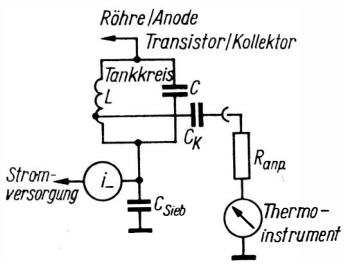


Bild 26
Tankkreis einer Senderstufe

derausgangsleistung bei geringstem Eingangsgleichstrom vorhanden ist. Das Maximum für I_{anp} und das Minimum für I- sind relativ breit. Die Bestimmung hochohmiger Anpassungswiderstände ist kritisch.

6.2. Anpassungswiderstand von Antennen

In Abschnitt 3.8. wurde bereits darauf eingegangen. Es soll nun noch eine andere Verfahrensweise beschrieben werden. Dazu muß man unterscheiden, ob die Antenne durch ihre geometrischen Abmessungen in Resonanz mit der Senderfrequenz ist oder ob sie durch zusätzliche Abstimmittel in Resonanz gebracht wird. Im ersteren Fall muß man dann einen zusätzlichen Generator verwenden, wenn die Senderfrequenz nicht genügend variabel ist, oder man benutzt das Dip-Meter, um die Resonanzfrequenz der Antenne festzustellen. Die vorhandene Senderenergie wird an den Antennenkreis gegeben, wobei man ein Antennenstrommesser zur Anzeige benutzt. Man registriert seinen Anzeigewert mit dem Eingangssendergleichstrom als zweiten Richtwert. Dann wird die Antenne entfernt, und es werden Schichtwiderstände eingesetzt. Ihre Werte (Belastung beachten) werden so lange verändert, bis der gleiche Antennenstrom und Eingangsgleichstrom vorhanden sind (z. B. Anodenstrom der Senderendröhre). Dann ist der Anpassungswiderstand der Antennenanlage gleich dem Wert des eingestellten Schichtwiderstands. Benutzt man da-

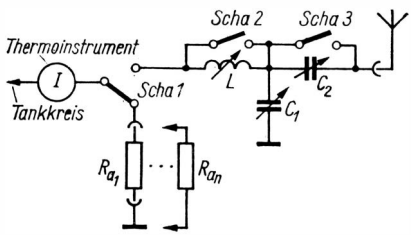


Bild 27 Vergleich eines ohmschen Widerstandes mit R_{anp} der Antenne

gegen sofort Abstimmittel, so wird mit diesen Resonanz hergestellt, was am maximalen Antennenstrom ersichtlich ist (Bild 27). Nun kann man R_{anp} wieder durch Substitution nach dem vorhin beschriebenen Verfahren bestimmen.

6.3. Anpassungswiderstände einiger den Amateur interessierender Gerätetypen

Es wurde schon erörtert, daß es nicht nur das Kriterium für Anpassung $R_{anp} = R_i$ gibt. Beispielsweise kann man bei Stromversorgungseinrichtungen nicht von dieser Beziehung ausgehen, weil das infolge des sehr niederohmigen R_i einem Kurzschluß gleichkäme. Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, daß noch andere Parameter bei Anpassungsfragen mit zu beachten sind. Deshalb sollte der Leser zu der jeweiligen Technik die Fachliteratur mit zu Rate ziehen.

7. Wellenwiderstandsmessungen

Besonders der Funkamateur interessiert sich meist für den Wellenwiderstand von Hochfrequenzkabeln. Da bei der Ermittlung des Wellenwiderstands Z die Blindwiderstände von den verteilten Kapazitäten und Induktivitäten dieser Leitungen höher als die Längs- und Querverluste sind, geht man von der vereinfachten Beziehung von Z aus:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \; ; \tag{32}$$

Z in Ω, L′ — leitungslängenbezogene Induktivität in H,
C′ — leitungslängenbezogene Kapazität in F.
Als Leitungslänge kann man z. B. 1 m Kabellänge annehmen. Zur Induktivitätsmessung schließt man das Leitungsende kurz und mißt diese nach den bereits beschriebenen Verfahren. Die Kapazitätsmessung wird bei offenem Leitungsende vorgenommen. Nach Kenntnis beider Werte kann man dann mit Gl. (32) den Wellenwiderstand Z berechnen. Aus der Praxis ist bekannt, daß das Kabel eine Dämpfung aufweist. Besonders im 2-m- und 70-cm-Band ist es wissenswert, mit welcher Dämpfung man rechnen muß. Gl. (32) ist als gute Näherung für Z zu werten. Zur Dämpfungsmessung schließt man die Leitung mit dem Widerstand der Größe Z ab und ermittelt Ein- und Ausgangsspannung, wobei das Kabel mit einem Generator gespeist wird. Sind diese Spannungen U_1 und U_2, so ist die Dämpfung:

$$b = \beta l = 10 \log \frac{U_1}{U_2} \; ; \tag{33}$$

b in dB, β-Dämpfungsmaß, l — Leitungslänge.

8. Messung des Kopplungsfaktors

Soll die Kopplung zwischen zwei nichtabgestimmten Spulen bestimmt werden, so wird zunächst ihre Induktivität nach dem in Bild 28 gezeigten Verfahren gemessen. Es ist:

$$L_{min} = L'' = L_1 + L_2 - 2M,$$
$$L_{max} = L' = L_1 + L_2 - 2M; \qquad (34)$$

weiter ergibt sich:

$$k = \frac{L' - L''}{4L_1L_2}. \qquad (35)$$

Die Induktivitäten ermittelt man mit der Brücke. Um den Kopplungsfaktor von abgestimmten Spulen zu messen, geht man nach der Schaltung entsprechend Bild 29 vor. Es wird die Resonanzfrequenz beider Kreise bestimmt. Es ist:

$$k = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2}. \qquad (36)$$

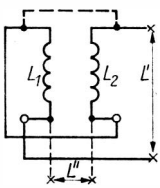


Bild 28
Kopplungsfaktor von Spulen

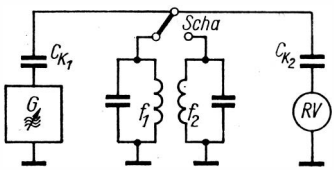


Bild 29
Kopplungsfaktor von abgestimmten Kreisen

9. Messungen an Transformatoren

Hin und wieder steht der Amateur vor der Aufgabe, Netztransformatoren selbst herzustellen. Meist wird er aber diese kaufen können, ohne seine Kenndaten genau zu kennen. Dabei sind einige Messungen erforderlich, die nachstehend beschrieben werden.

9.1. Orientierende Messungen an Transformatoren

Aus dem Blechpaket läßt sich an Hand von Standards erkennen, welche Typenleistung der Transformator hat [10]. Dann wird an die Wicklung mit dem stärksten Draht (die Anschlüsse kann man mit dem Durchgangsprüfer feststellen) eine Netzspannung gelegt, die man, von 0 beginnend, aufwärtsregelt. Dabei werden im Leerlauf die Spannungen der anderen Wicklungen überprüft. Hierbei läßt sich leicht erkennen, ob „krumme Werte" zustande kommen. Beispielsweise muß sich an einer Wicklung die Netzspannung von 127 V oder 220 V einstellen, wenn an der eingespeisten Wicklung 2 V, 4 V, 6,3 V, 12 V oder ähnliche liegen. Absolut sicher ist das Verfahren nicht, da es Transformatoren mit abweichenden Spannungen gibt bzw. auch solche, die nicht für Netzfrequenz ausgelegt sind. Legt man eine Stromdichte von 2,5 A/mm² zugrunde, so kann man an Hand des Drahtdurchmessers auf den Laststrom schließen. Dieser ist dann $I \approx 2d^2$ (d in mm, I in A). Das beschriebene Verfahren ist nicht für NF-Übertrager geeignet.

9.2 Kurzschlußspannung, Leerlaufspannung, Kupfer- und Eisenverluste

Zum Messen der Kurzschlußspannung U_k wird ein Strommesser an die Sekundärseite des Transformators (Bild 30)

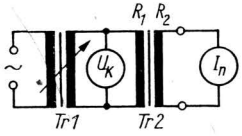


Bild 30
Messung der Kurzschlußspannung von Transformatoren

angeschlossen. Dann regelt man die Primärspannung so weit, daß der sekundäre Nennstrom fließt. Die dazu erforderliche Primärspannung ist die Kurzschlußspannung U_k Sie beträgt 3 bis 10% von U_1. Für das Übersetzungsverhältnis gilt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}. \tag{37}$$

Die Spannungen und Ströme sind die Nennwerte. Belastet man die Sekundärseite nicht, so ergibt sich bei der Spannung U_1 der Leerlaufstrom I_0. Damit kann man die Leerlaufleistung ermitteln. Die Widerstände R_1 und R_2 lassen sich mit dem Ohmmeter messen. Für die Kupferverluste erhält man dann mit guter Näherung:

$$P_{Cu} \approx (R_1 + R_2)\, I_2^2. \tag{38}$$

Die Eisenverluste sind:

$$P_{Fe}\, \frac{U_1^2}{P_{w1}}; \tag{39}$$

P in W, P_{w1} — Wirkleistung bei Leerlauf.

Zur Messung der Gegeninduktivität M, des Kopplungsfaktors k und der Streuung (die Größen sind besonders bei NF-Transformatoren wissenswert) kann man die Scheinwiderstände der nachstehenden Größen mit einer Brücke feststellen oder durch Strom-Spannungsmessung ermitteln. Der Scheinwiderstand $\mathfrak{R}_l$ bei offener Sekundärseite, der Scheinwiderstand der Primärseite $\mathfrak{R}_k$ bei kurzgeschlossener Sekundärseite (wieder die Primärspannung von 0 so weit hochregeln, daß sekundärer Nennstrom fließt) und der Scheinwiderstand $\mathfrak{R}_{sl}$ bei offener Primärseite lassen sich messen, wenn die Sekundär-

seite mit U_2 betrieben wird. Aus diesen Werten kann man **M** und **k** bestimmen:

$$M = \frac{1}{\omega} \sqrt{(\mathfrak{R}_1 - \mathfrak{R}_k)\, \mathfrak{R}_{sl}} \,, \tag{40}$$

$$k = \sqrt{1 - \frac{\mathfrak{R}_k}{\mathfrak{R}_1}} \,.$$

Der Streufaktor ist:

$$\sigma_{ges} = 1 - k^2 \,. \tag{41}$$

Die Streuinduktivitäten ergeben sich schließlich zu:

$$L_{1st} = \sigma_{ges} L_1, \quad L_{2st} = \sigma_{ges} L_2 \,. \tag{42}$$

In Gl. (37) wurde für Netztransformatoren vereinfachend $k = 1$ gesetzt. Bei NF-Transformatoren kann k 0,8 bis 0,9 sein!

10. Messung der Induktivität von NF-Drosseln

Soll die Induktivität von NF-Drosseln gemessen werden, dann ist zu beachten, ob bei der Verwendung der Drossel Gleichstrom durch die Wicklung fließt. In diesem Fall ergibt sich eine Herabsetzung der Induktivität. Deshalb ist bei der Messung der Betriebsstrom zu berücksichtigen. Bild 31 zeigt eine einfache Meßschaltung. Der Vorwiderstand R_V müßte einen Wert haben, der wesentlich höher als der Blindwiderstand der Drossel bei der Meßfrequenz ist. Hierbei besteht aber eine gewisse Schwierigkeit, da die Betriebsgleichspannung dann relativ hohe Werte annimmt und der Verbrauch an R_V hoch wird. Um dem etwas zu begegnen, verwendet man eine niedrige Meßfrequenz und führt die Messung zunächst ohne fließenden Gleichstrom durch. Danach erhöht man langsam den Strom und führt erneut die L-Messung durch. Die Wechselspannung darf auch nur gering sein.

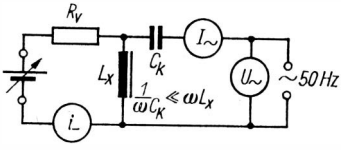


Bild 31
Induktivitätsmessung von vormagnetisierten Drosseln

11. Strom- und Spannungsmessungen

In diesem Abschnitt sollen gesondert die Strom- und die Spannungsmessung erörtert werden.

11.1. Strom- und Spannungsmessungen bei Gleichstrom

11.1.1. Spannungsmessungen mit Anzeigeinstrumenten

Wie bereits an anderer Stelle darauf hingewiesen wurde, sind eine Reihe von Voraussetzungen an den Instrumenten zu erfüllen. Sie haben außer der Genauigkeit die Bedingung zu erfüllen, daß diese gegenüber der Spannung an der Meßstelle keine oder nur eine unbedeutende Veränderung verursachen. Es läßt sich feststellen, daß der R_i des Instruments hochohmig sein muß. Für niederohmige Innenwiderstände von Generatoren und Batterien eignen sich deshalb Instrumente, deren Eigenverbrauch kaum eine Rolle spielt. Bei Messungen an Verstärkern, Empfängern und kleinen Sendern verwendet man Drehspulinstrumente mit 20 kΩ/V. Regelspannungs- und Arbeitspunktmessungen bei Transistoren (hochohmiger Vorwiderstand oder Spannungsteiler) werden mit dem RV durchgeführt.

11.1.2. Spannungsmessung durch Kompensation

Teilweise stehen die in Abschnitt 12.1.1. genannten Instrumente nicht zur Verfügung. Bild 32 zeigt eine einfache Schaltung zur Spannungskompensation. Der zu messenden Spannung U_x ist die durch das Potentiometer einstellbare Spannung U entgegengeschaltet. Bei Stromlosigkeit vom Instrument I ergibt sich $U_x = U$. Bis diese Bedingung eingestellt ist, muß man das Instrument I durch R_p mehr oder weniger

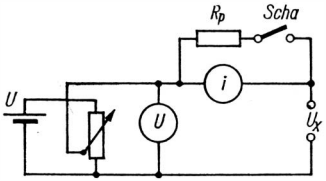


Bild 32
Spannungskompensation

unempfindlich machen, um es nicht zu überlasten. Je empfindlicher „I" und je besser die Klasse von „U", um so genauer die Spannungsmessung. Auf den Eigenverbrauch von „U" kommt es in erster Näherung nicht an. Damit das Ermitteln von U_x nicht zu langwierig wird, sollte man vorher ungefähre Vorstellungen vom U_x-Wert haben.

11.1.3. Messung von Spannungen im Millivoltbereich

Um diese relativ geringen Spannungen messen zu können (keine Belastung des Meßobjekts), benutzt man die Schaltung nach Bild 33. Der Transistor ist als Zweig einer Brücke angeordnet. Mit dem Potentiometer bringt man das Instrument in Nullstellung. Die zu messende Spannung ändert den Arbeitspunkt des Transistors, was als Ausschlag am Instrument zu erkennen ist. Höhere Spannungen können durch Spannungsteiler gemessen werden. Schließlich ergibt sich die Möglichkeit, durch eine Diode am Eingang des Transistors auch Wechselspannungen zu messen. Die Stabilität des Arbeitspunkts ist nicht hoch. Aus diesem Grunde ist vor jeder Messung die Nullage des Instruments zu kontrollieren.

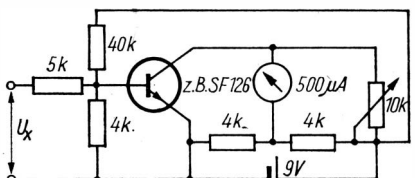


Bild 33
Spannungsmessung im mV-Bereich

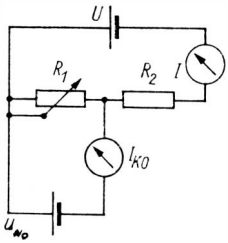


Bild 34
Kompensationsschaltung zur Bestimmung von I

11.2. Strommessungen bei Gleichstrom

11.2.1. Messungen mit Anzeigeinstrument

Für den Amateur kommen vornehmlich Messungen mit Drehspulinstrument in Frage. Wie derartige Messungen durchgeführt werden müssen, wurde bereits in Abschnitt 3.4. erwähnt. Als weiteres Instrument sei das Dreheiseninstrument genannt. Es werden auch zuweilen Elektrodynamometer und Thermoinstrumente angewendet.

11.2.2. Strommessungen durch Spannungsabfall

Dazu verwendet man die Kompensationsschaltung nach Bild 34. Welcher Strom durch R_2 wirklich fließt, läßt sich ermitteln, wenn an einem veränderlichen geeichten Widerstand R_1 eine Spannung abfällt und im Strommesser I_{ko} kein Strom mehr fließt. Es ist dann $I = U_{No}/R_1$, weil der Spannungsabfall an R_1 (der durch I verursacht wird) gleich dem der Normalspannungsquelle ist. Die Spannungsquelle ist ein Normalelement, das nicht belastet werden darf. Für Amateurzwecke genügt sicher als Normal eine Referenzdiode. Das Instrument I_{Ko} ist ein Mikroamperemeter. Bis zur Nullanzeige muß das Instrument durch Parallelwiderstände geschützt werden. Ein sehr einfaches Verfahren der Messung des Stromes I besteht darin, den unbekannten Strom durch einen bekannten Widerstand fließen zu lassen und mit einem Instrument den Spannungsabfall U zu messen. Dann ist $I = U/R$. Die entsprechende

Genauigkeit des vorstehend beschriebenen Verfahrens hängt im allgemeinen von der vorhandenen Genauigkeit der verwendeten Instrumente ab.

11.3. Spannungsmessungen bei Nieder- und Hochfrequenz

Die Feststellung, daß durch die Spannungsmessung möglichst nicht die Verhältnisse am Meßobjekt verändert werden sollten, gilt bei Wechselspannungen genauso. Bei Frequenzen bis 1000 Hz eignet sich auch das Dreheiseninstrument (verzerrte Kurvenform möglich), ferner das Drehspulinstrument mit Gleichrichter. Hierbei sind noch höhere Frequenzen zugelassen. Allerdings darf die Wechselspannung nicht verzerrt sein, da die Skale in Effektivwerten geeicht ist. Ebenso verwendet man das Thermoinstrument. Je nach Aufbau des Thermokreuzes lassen sich Wechselspannungen bis weit über 30 MHz messen. Die Spannung kann ebenfalls eine verzerrte Kurvenform haben. Geringe Wechselspannungen kann man mit dem RV messen. Hierbei ist bezüglich der Kurvenform gleichfalls Verzerrungsfreiheit erforderlich. Das Diodenvoltmeter (Bild 35) kann vom Amateur selbst hergestellt werden. Seine Empfindlichkeit wird mit durch das Instrument bestimmt. Die Empfindlichkeit des Mikroamperemeters sollte gleich oder kleiner als 50 μA sein. Für die angegebene Schaltung wird am Meßobjekt kein geschlossener Gleichstromkreis benötigt. Das Meßobjekt wird mit R/3 belastet. Deshalb muß man das in der Messung berücksichtigen, d. h., der Widerstand an der Meßstelle muß wesentlich niederohmiger als R/3 sein. Ebenfalls ist die Eingangskapazität besonders bei Hochfrequenz zu be-

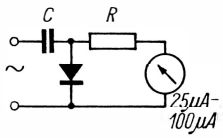


Bild 35
Diodenvoltmeter

rücksichtigen. Durch den Anschluß des Diodenvoltmeters kann demnach eine Verstimmung eines Kreises entstehen. Die Kopplungskapazität richtet sich nach der zu messenden Frequenz. Sie kann z. B. bei Frequenzen über 30 MHz nur 1 bis 2 pF betragen. Es wird auch die Spitzenspannung der Wechselspannung gemessen. In diesem Fall muß die Zeitkonstante $R \cdot C \gg$ als die Periodendauer der Frequenz der zu messenden Spannung sein. Weitere Ausführungen findet der Leser in der Spezialliteratur. Mit dem RV kann man sowohl Nieder- als auch Hochfrequenz bis zu wenigen Millivolt messen.

11.4. Strommessungen bei Nieder- und Hochfrequenz

Hier gelten die Feststellungen hinsichtlich des R_i der Instrumente wie bei Gleichstrom. Die Instrumente müssen für die Meßfrequenz geeignet sein. Sonst können infolge Skineffekts bei der Strommessung mit Thermoinstrument im UKW-Gebiet Meßfehler entstehen. Es wird ein geringerer Strom angezeigt, als wirklich fließt. Allerdings sind auch noch Parallelkapazitäten vorhanden. Eine beliebte Anzeigemöglichkeit von HF-Strömen, die mehr als Relativanzeige zu bewerten ist, bietet der Stromwandler. Das Verfahren läßt sich auch bei niedrigen Frequenzen anwenden. Der Funkamateur verwendet den Stromwandler zum Nachweis des Antennenstroms, wenn ihm kein Thermoinstrument zur Verfügung steht. Bild 36 zeigt die Ausführung eines solchen Wandlers zur Relativanzeige. Es wird ein Ringkern bewickelt. Durch die Mitte des Kerns steckt man den Antennendraht. In der Wicklung wird eine Spannung induziert; die im Bild gezeigte Gleichrichterschaltung bewirkt eine Anzeige am Instrument. Die Anzahl der Windungen ist abhängig von dem zu erwartenden Antennen-

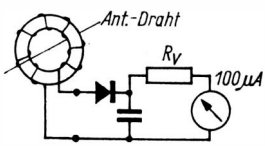


Bild 36
Stromwandler

strom. Bei einer Sendeleistung von 50 W benötigt man nicht mehr als 20 Windungen. Die Funktionsweise der Bolometerbrücke ist in der Spezialliteratur erläutert.

12. Einfache Indikatoren

Besonders beim Service bzw. bei mobilen Einsätzen ist es immer zweckmäßig, entsprechende einfachste Indikatoren zum Nachweis zu benutzen. Bild 37 zeigt dazu eine Auswahl. Mit den Anordnungen a und b kann man nachweisen, ob Durchgang bei Wicklungen und Verbindungen vorhanden ist. Es muß beachtet werden, daß sich der Summer für Wicklungen nicht eignet. Das Ohmmeter (Abschnitt 3.) ist ein ausgezeichnetes Servicegerät. Die Glimmlampe (c) läßt sich als Indikator für Antennenspannungen sowie Gleich- und Wechselspannungen verwenden (Vorsicht bei der Handhabung!).

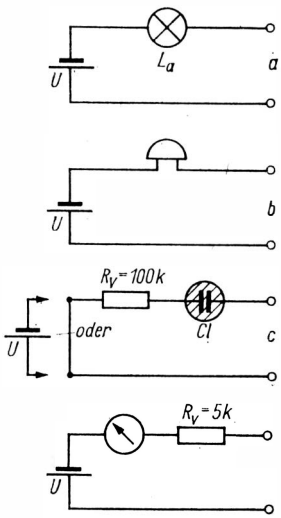


Bild 37
Indikatoren

Bei galvanischer Verbindung mit der Meßstelle muß man einen Vorwiderstand von 100 kΩ benutzen. Es ist auch möglich, die Glimmlampe an eine Spannung von 100 V zu legen und die Anordnung für Durchgangs- und Widerstandsmessungen zu verwenden.

13. Leistungsmessung

13.1. Leistungsmessung bei Gleichstrom

Durch Strom-Spannungsmessung kann man die Leistung bei Gleichstrom ermitteln:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}\,; \tag{43}$$

P in W, U in V, I in A, R in Ω.
Mit dem Wattmeter wird das Meßergebnis sofort in Watt angezeigt. Bild 38 zeigt die Meßschaltung. Die Stromspule des Wattmeters liegt in Serie mit dem Lastwiderstand und die Spannungsspule parallel zu ihm. Dadurch, daß man die Spannungsspule vor oder nach der Stromspule anschließen kann, ist das Ergebnis der Leistungsmessung unterschiedlich.

13.2. Leistungsmessung bei Wechselstrom

Zunächst soll der Einphasenwechselstrom bei f = 50 Hz betrachtet werden. Zur Messung kann man ebenfalls das Wattmeter verwenden (Bild 38). Die Wirkleistung wird:

$$P_{wi} = U \cdot I \cdot \cos \varphi\,. \tag{44}$$

In diesem Fall handelt es sich um Drehstrom (Dreiphasen-

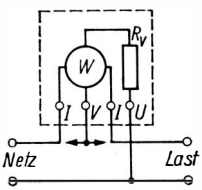


Bild 38
Möglichkeiten der Anschlüsse des Wattmeters

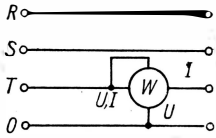


Bild 39
Drehstromwirkleistung bei gleicher Last der Phasen

wechselstrom) mit gleicher Lastverteilung der Phasen, wozu die Meßschaltung nach Bild 39 verwendet werden kann. Die Gesamt-Leistung ist dann die Phasenleistung mal 3. Ist der Nulleiter nicht zugänglich, so kann man mit Widerständen einen künstlichen Nullpunkt schaffen (Bild 40). Ist nun ungleiche Last vorhanden, dann muß das Gerät in jede Phase gelegt werden, und die Leistungen sind einzeln zu addieren. Die Zwei- und Drei-Wattmeter-Methode scheidet für den Amateur aus. Soll die Blindleistung ermittelt werden, so schaltet man in den Pfad der Spannungsspule eine Spule genügend großer Induktivität oder einen Kondensator (Bild 41). Für die Blindleistung gilt bekanntlich:

$$P_{bl} = U \cdot I \cdot \sin \varphi \; ; \qquad (45)$$

P_{bl} in VA, U in V, I in A, φ in Grad.

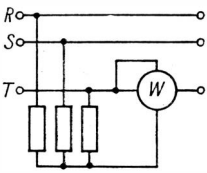


Bild 40
Drehstromwirkleistung bei gleicher Last der Phasen mit künstlichem Nullpunkt

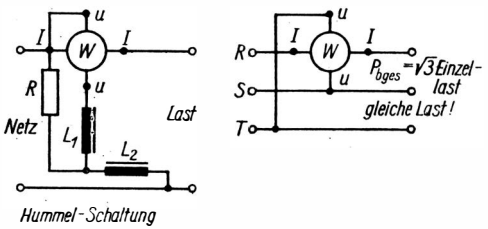


Bild 41 Blindleistung bei Einphasenwechselstrom und Drehstrom

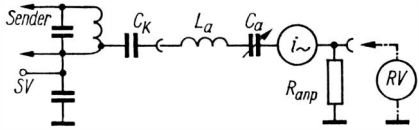


Bild 42
Serienschwingkreis zur Abstimmung beim Lastwiderstand

Die von einem Hochfrequenzsender abgegebene Leistung wird am zweckmäßigsten am Anpassungswiderstand gemessen. Wie bereits erklärt, ist es hierbei ratsam, die eventuell vorhandenen Blindkomponenten durch einen Serienresonanzkreis auszustimmen (Bild 42). Seine Güte muß mindestens 200 ohne R_{anp} sein. Als Indikator wirkt das Thermoinstrument für Resonanz (Maximumanzeige) und Strommessung. Daraus läßt sich dann leicht die Leistung errechnen. Es läßt sich auch ein RV verwenden. Dieses ist parallel R_{an} zu schalten. R_{an} ist dann einseitig an das Bezugspotential der Schaltung zu legen. Die Genauigkeit der Messung hängt auch von der des Instruments und des Auf-baus ab. Der Meßfehler liegt bei 5%.
Fehlt das Thermoinstrument oder das RV, so kann man bis zu 7 MHz eine Leistungsmessung mit der Kohlenfadenlampe durchführen. Durch Vergleich der Lichthelligkeit mit Hochfrequenz und Speisung der Lampe mit Gleichstrom (auch 50-Hz-Netzwechselstrom) läßt sich die Leistung des Senders angenähert feststellen. Die Helligkeitsanzeige erfolgt mit einer Fotozelle, die von der Meßlampe beleuchtet wird. Ergeben sich keine Unterschiede in beiden Speisungsarten, so ist $P_{Ho} = P_{vergl}$. Die kalometrische Messung läßt sich bis in höchste Frequenzgebiete anwenden. Für Amateure ist sie wegen des Aufwands jedoch nicht möglich. Auf die Leistungsmessung mit Oszillografen soll nicht eingegangen werden. Bild 43 zeigt eine

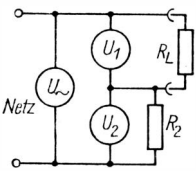


Bild 43
Dreivoltmetermethode

interessante Meßschaltung mit drei Spannungsmessern (bis 500 Hz). Es ist auch möglich, die Spannungen nacheinander mit einem Instrument zu ermitteln. Es werden die Wirkleistung und der Phasenwinkel gemessen. Man schaltet einen ohmschen Widerstand in Reihe mit dem Lastwiderstand R_L. Die Instrumentenwiderstände R_i müssen hoch gegen R_L und R_2 sein. Die Wirkleistung ist:

$$P_{wi} = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2\,R_2}. \tag{46}$$

Der Phasenwinkel ergibt sich zu:

$$\cos \varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1U_2}. \tag{47}$$

14. Wirkungsgrad

Die Ermittlung des Wirkungsgrads ergibt sich durch Leistungsmessungen. Dazu sind Gleichströme bzw. Wirkleistungen ins Verhältnis zu setzen:

$$\eta = \frac{P_{\text{abgegeben}}}{P_{\text{zugeführt}}} . \tag{48}$$

Es ist nicht immer leicht, die oben angegebenen Leistungen zu analysieren. Auch kann sich η durch Teilwirkungsgrade (Wirkungsgrade von Unterbaugruppen) zusammensetzen. Dieses Problem soll am Beispiel einer Senderendstufe behandelt werden. Dazu wird von der Senderendröhre ausgegangen. Die von dieser an den Tankkreis abgegebene Leistung ist P_o. Infolge der Eigenverluste im Kreis P_{kr} wird die am Lastwiderstand R_L zur Verfügung stehende Leistung P_L geringer als P_o sein. Die anodenseitig in die Röhre gegebene Leistung ist P_i. Also wäre der anodenseitige Wirkungsgrad:

$$\eta_{an} = \frac{P_o}{P_i} . \tag{49}$$

Der Wirkungsgrad bezüglich des Lastwiderstands ist dann:

$$\eta_L = \frac{P_L}{P_O} . \tag{50}$$

Der Lastwiderstand setzt sich aus dem gesamten Verlustwiderstand der Antennenanlage (R_V) und dem Strahlungswiderstand der Antenne zusammen. Vom Standpunkt der Nutzleistung, die an R_S (Strahlungswiderstand) verbraucht wird, ist der Wirkungsgrad:

$$\eta_S = \frac{P_S}{P_L} . \tag{51}$$

Damit wäre der Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta_{es} = \eta_{an} \cdot \eta_{L} \cdot \eta_{S} . \tag{52}$$

Bedenkt man noch, daß die Röhre eine Reihe weiterer Leistungen zu ihrer Funktion benötigt, so wird der Gesamtwirkungsgrad noch geringer.

15. Spezielle Leistungsmessungen

Der Abschnitt soll mit zwei weiteren Leistungsbetrachtungen abgeschlossen werden. Zunächst wird die Leistungsmessung bei SSB-Sendern und dann die Messung der von Sendern an die Antenne abgegebenen Leistung mit Reflektometer erläutert.

15.1. Leistungsmessung bei SSB

Bei dieser Beschreibung wird eine Linearendstufe vorausgesetzt. Es ist die Bedingung zu erfüllen, daß bei SSB 99% der mit der mittleren HF-Leistung ausgestrahlten Frequenzen im vorgesehenen NF-Band liegen. Der Rest von 1% muß an den Bandgrenzen mit 12 dB/Oktave abfallen. Bei der Modulation der Endstufe müssen die Intermodulationsverzerrungen mit zwei im NF-Band befindlichen Frequenzen gleicher Amplitude (aber keinem harmonischen Verhältnis, z. B. 1 kHz und 2 kHz) leistungsmäßig mindestens 30 dB unter dem PEP-Ausgangsleistungswert liegen [13]. Das wäre der Faktor 1000. PEP heißt *peak envelop power* und bedeutet *Spitzenleistung bei Modulation*. Diese Spitzenleistung kann man mit dem Oszillografen sichtbar machen. Besser ist es, wenn der Abstand 40 dB beträgt. Die Senderleistung wird nun — wie bereits früher erläutert — in einem Lastwiderstand verbraucht. Im Lastkreis sind sämtliche Blindkomponenten auszustimmen. Am Widerstand kann man eine mittlere Leistung von 50% der PEP-Leistung bei Zwei-Ton-Modulation erhalten. Allgemein wird mit 10% Verlust im Tankkreis und in den Anpassungsgliedern gerechnet. Deshalb beträgt der Wirkungsgrad der Endstufe 60%. Die Inputleistung ist dann etwa 2mal PEP. In Zahlen ausgedrückt, ergibt sich z. B.:

— Durchschnittsleistung am Lastwiderstand 100 W,

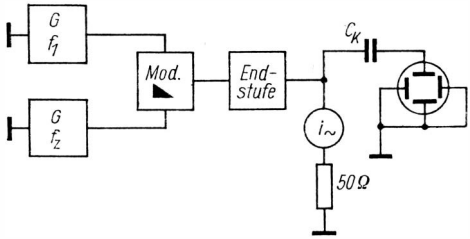


Bild 44 Leistungsmessung bei SSB

— PEP-Leistung 200 W,
— PIP-Leistung 400 W.

Diese Werte beziehen sich also auf die Zwei-Ton-Modulation. PIP ist ebenfalls eine Spitzenleistung, die man nicht mit dem Drehspulinstrument im Anodenkreis messen kann. Bild 44 zeigt die Meßschaltung. Von zwei Tongeneratoren werden Amplituden mit gleicher Höhe an die Modulationseinrichtung des Senders gelegt, und der Lastkreis wird mit $R_{an} = 50\,\Omega$ abgestimmt. Mit dem Antenneninstrument mißt man den Strom, um die mittlere Leistung zu erhalten. Mit dem Oszillografen wird die Spitzenspannung gemessen. Hierbei muß dann

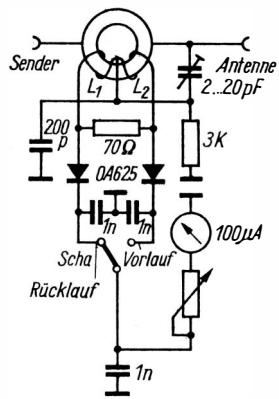


Bild 45
Reflektometer bis 30 MHz

ein Vergleich mit einer bekannten Spannung vorgenommen werden.

15.2. Das Reflektometer

Um festzustellen, welche HF-Leistung vom Sender zur Antenne gelangt, kann auch das Reflektometer verwendet werden. Dazu nachstehend zwei Schaltungen [9].

In Bild 45 ist die Anordnung für Messungen bei den Amateurbändern bis 30 MHz dargestellt. Auf einem Ferritkern befinden sich die bifilar gewickelten Richtkopplerleitungen (dessen Durchmesser 10 mm beträgt). Durch den Kern wird der Antennendraht gesteckt. Mit dem Potentiometer läßt sich die Empfindlichkeit einstellen. Der Trimmer gestattet, den Nullabgleich herzustellen. Der Schalter Schl schaltet die Diodenspannungen für Vor- und Rückwärts. Mit dem 70-Ω-Schichtwiderstand solle eine möglichst weite Frequenzunabhängigkeit der Teilinduktivitäten erreicht werden. Ein Nachbau des Reflektometers ist mit einiger Geschicklichkeit durchaus möglich. Bild 46 zeigt die Schaltung für Frequenzen bis in das 70-cm-Band. Hier ist der Innenleiter mit dem Sender und der Antenne verbunden. Seine Länge beträgt etwa 15 cm. Parallel zu ihm sind die Richtkopplerleitungen angebracht. Es darf jedoch nicht vorkommen, daß durch den Anschluß des Re-

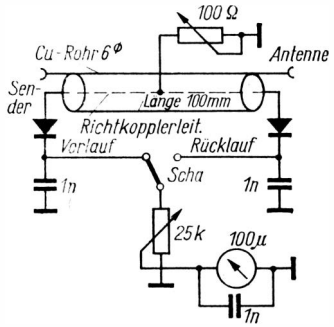


Bild 46
Reflektometer bis zum 70-cm-Band

flektometers eine fühlbare Stoßstelle entsteht. Deshalb sind die Wellenwiderstandsverhältnisse auf der Speiseleitung zur Antenne nicht zu verändern. Es werden nun noch die Beziehungen genannt, die erforderlich sind, um die Leistung zu ermitteln. Die Leistung P_s ist die vom Sender abgegebene Leistung, die man mit den bereits beschriebenen Verfahren messen kann. Das Stehwellenverhältnis ermittelt man relativ mit dem Richtkoppler in beiden Schaltungen:

$$s = \frac{U_h + U_r}{U_h - U_r} . \tag{53}$$

Damit wird der Betrag des Reflektionsfaktors:

$$r = \frac{s - 1}{s + 1} \tag{54}$$

und schließlich die Antennenleistung:

$$P_{ant} = P_s (1 - r^2) . \tag{55}$$

16. Phasenwinkelmessung mit dem Oszillografen

Im Zusammenhang mit Messungen zum Scheinwiderstand wie der Leistung bei Wechselstrom wurde der Phasenwinkel φ erwähnt. Es soll jetzt darauf eingegangen werden, wie dieser Winkel meßtechnisch mit dem Oszillografen ermittelt wird. Dazu legt man an die Eingänge des Oszillografen (X und Y) die Meßspannungen, wobei die eine der Spannung und die andere dem Strom proportional ist. Die Amplitude und die Frequenz dieser Spannungen sind gleich. Das Kippgerät wird zur Messung nicht benötigt. Bei genügender Erfahrung im Meßvorgang können die Spannungen auch etwas unterschiedlich sein. Erwähnenswert ist noch, daß die an die Eingänge des Oszillografen gegebenen Spannungen sinusförmig sein sollten. Man erhält dann auf dem Bildschirm Figuren, wie sie in Bild 47 dargestellt sind. Es gibt Mehrdeutigkeiten in der Anzeige, die sich aber nur bei völliger Unkenntnis der zu messenden Verhältnisse auswirken können. Eindeutige Messungen erhält man mit einem Spezialgerät (s. Fachliteratur). Man sollte aber die soeben getroffene Feststellung nicht überbewerten, da für viele Anwendungen eine sofortige Aussage über φ möglich ist. Nach Bild 48 kann man durch Streckenmessungen den Winkel bestimmen. Der Sinus dieses Winkels ist:

$$\sin \varphi = \frac{x_0}{a_1} = \frac{y_0}{a_2} . \tag{56}$$

Verfügt man über einen Zweistrahloszillografen, so läßt sich der Winkel durch den Unterschied der Nulldurchgänge beider Spannungen messen. Bekanntlich entspricht eine Perioden-

Bild 47
Figuren zum Phasenwinkel

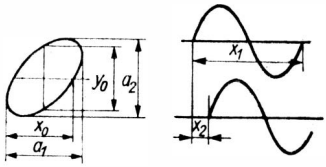


Bild 48
Bestimmung des Phasenwinkels aus der Lage der Figur

dauer 360° (Bild 49). Dort ist auch die Meßschaltung für das andere Verfahren wiedergegeben:

$$\varphi = \frac{x_2\, 360°}{x_1} . \tag{57}$$

Falls ein elektronischer Schalter zur Verfügung steht, kann man mit dem Einstrahloszillografen arbeiten.

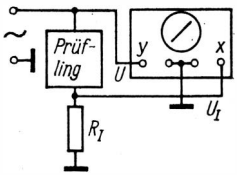


Bild 49
Bestimmung des Phasenwinkels aus der Lage der Nulldurchgänge

17. Frequenzmessungen

17.1. Zungenfrequenzmesser

Das Meßgerät verwendet man hauptsächlich zum Messen der Netzfrequenz. Zur Funktionsweise des Geräts ist zu sagen, daß das Feld eines Elektromagneten (der vom Strom der Meßfrequenz durchflossen wird) auf einige Stahlzungen wirkt. Infolge der relativ hohen Güte dieser mechanischen Schwinger ($Q \approx 30$) kommen nur die Stahlzungen in Resonanz, die in unmittelbarer Nähe der Frequenz f_x ihre Eigenresonanz haben. Die Zunge, die mit f_x genau übereinstimmt, zeigt den größten Ausschlag (Bild 50). Die Genauigkeit liegt bei 2%.

17.2. Frequenzmeßbrücke nach *Wien-Robinson*

Dieses Verfahren kann der Amateur jederzeit durchführen. Bild 51 zeigt die Schaltung. Die Brücke wird mit $R_2 - R_1$ abgestimmt. Im Grenzfall kann man beide Widerstände getrennt bedienen, jedoch ist die Einknopfbedienung besser. Für die Frequenz f_x gilt bei Brückengleichgewicht:

$$f_x = \frac{0{,}159}{RC} \; ; \tag{58}$$

f in Hz, R in Ω, C in F.
Dazu gilt $C_1 = C_2 = C$, $R_1 = R_2 = R$, $R_3 = 2R_4$. Die Amplitude der Meßfrequenz muß so hoch sein, daß gute Ablesemöglichkeit besteht. Wäre z. B. $f_x = 1000$ Hz, so könnte $R = 1590\,\Omega$ und $C = 0{,}1\,\mu F$ sein.

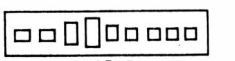


Bild 50
Zungenfrequenzmesser

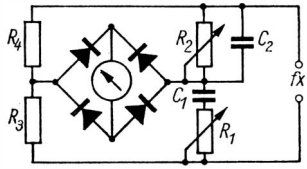


Bild 51
Wien-Robinson-Frequenzbrücke

17.3. Frequenzmessung nach dem Kondensatorladungsprinzip

Das Verfahren besteht darin, einen Kondensator mit steigender Frequenz mehr aufzuladen. Man betrachte dazu Bild 52. Als Meßspannung kann man Impulse oder sinusförmige Spannungen verwenden. T1 arbeitet als Vorverstärker, die folgenden Transistoren T2, T3 sind Impulsformer. Die Diode Gr1 läßt nur positive Impulse durch; diese steuern den Monomultivibrator. Je nach der Impulsfrequenz werden die umschaltbaren Kondensatoren aufgeladen (Bereiche). Mit dem Regler stellt man die Grenzen der Bereiche ein. Sie umfassen den Bereich von 10 Hz bis 300 kHz. Außer der unbekannten Frequenz f_x lassen sich auch Drehzahlen von Automotoren messen, indem die Zündimpulse an den Eingang des Geräts gelegt werden. Die Meßspannung beträgt etwa 10 mV. Die Induktivität L1 wird nur dann benötigt, wenn ein zu großer Abfall der Spannung bei den oberen Frequenzen vorhanden ist. Es können Ge- und Si-Transistoren entsprechender Grenzfrequenz verwendet werden.

17.4. Frequenzmessung mit dem Oszillografen

Man gibt an den Eingang des Oszillografen die Meßspannung der Frequenz f_x (Bild 53). Auf dem Bildschirm erscheinen dann die Kurvenzüge. Durch Vergleich mit der Kippfrequenz f_{kl} ergeben sich stehende Bilder, wenn $f_x = f_{kl}$ oder $f = nf_{kl}$ ist. Die genaue Kippfrequenz läßt sich allerdings bei den Oszillografen, die dem Amateur zugänglich sind, nicht angeben. Des-

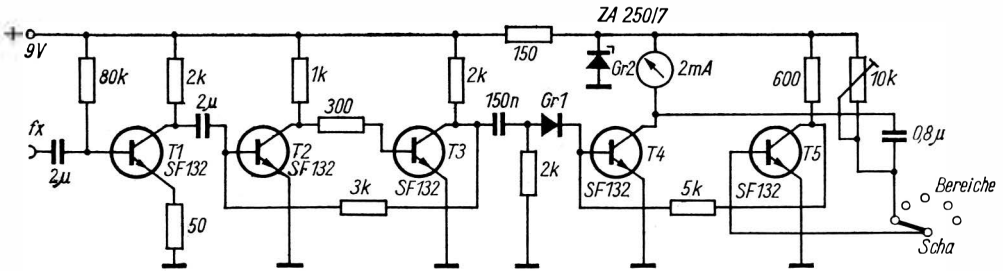


Bild 52 Transistorisierter Frequenzmesser

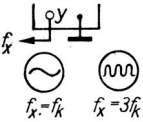


Bild 53
Frequenzmessung mit dem Oszillografen

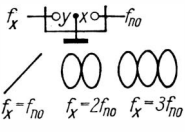


Bild 54
Lissajous-Figuren

halb ist f_x nur mit einiger Näherung zu messen. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, mit der im Oszillografen vorhandenen 50-Hz-Frequenz Vergleiche anzustellen. Hierbei kommt man zu genaueren Meßergebnissen. Genauere Messungen lassen sich mit *Lissajous*-Figuren durchführen. Dabei legt man an beide Eingänge die Spannungen mit der Frequenz f_x und f_{no}. Die Frepuenz f_{no} ist die Normal- oder Vergleichsfrequenz. Ihr relativer Fehler sollte um wenigstens eine Größenordnung geringer sein. In Bild 54 sind einige Figuren wiedergegeben. Hierbei wird auch noch vorausgesetzt, daß die Spannungen sinusförmig sind. Man kann allerdings auch mit verzerrten Spannungen arbeiten, was bei großem Frequenzunterschied zwischen f_x und f_{no} viel Erfahrung voraussetzt. Bei unterschiedlichen Amplituden sind die Seiten- und Höhenauslenkungen nicht mehr gleich. Das muß man bei unterschiedlichem Verstärkungsgrad des X- und Y-Verstärkers beachten. Zur Deutung der Bilder denkt man sich an die Figur eine senkrechte und waagerechte Tangente (Bild 55). Durch die *Lissajous*-Figuren ergeben sich dann Berührungspunkte, die das Frequenzverhältnis darstellen. Im Bild beträgt das Verhältnis 2:1 und 3:2.

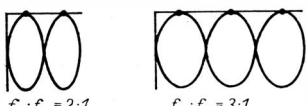


Bild 55
Frequenzverhältnisse mit *Lissajous*-Figuren

17.5. Frequenzmessung mit dem Schwingkreis

Ein beliebtes Gerät zur Frequenzmessung ist bei den Funkamateuren der Absorptionsfrequenzmesser. Er hat als frequenzbestimmendes Glied einen Parallelschwingkreis. Auf der variablen Achse (z. B. Drehkondensator) ist ein Zeiger angebracht, der auf der Skale die Frequenz f_x anzeigt. Die Anzeige geschieht am einfachsten mit einem Strommesser, der den Diodenrichtstrom anzeigt. Bild 56 zeigt eine mögliche Schaltung. Zur Bereichsumschaltung werden jeweils Windungen der Spule kurzgeschlossen. Am elegantesten arbeitet man allerdings mit einem sogenannten Spulenrevolver. Hierbei ergeben sich die kürzesten Leitungsverbindungen und die geringsten Kreisverluste. Den Kreis koppelt man induktiv an das Meßobjekt an. Leider werden zur Anzeige relativ hohe Spannungen benötigt. Aus diesem Grund ist der Anwendungsbereich des Geräts eingeschränkt. Durch einen Transistorverstärker kann die Empfindlichkeit des Geräts jedoch erhöht werden. Beispielsweise wäre es dann möglich, die Oszillatorfrequenz eines Überlagerungsempfängers zu messen.

Zweideutigkeiten in der Anzeige sind kaum möglich, weil eine Harmonische (2- oder 3fache Frequenz) eine geringere Amplitude hat. Die Schwingkreisgüte soll bei 200 liegen. Das beschriebene Verfahren läßt sich bis in das 2-m-Band verwenden. Die Meßgenauigkeit liegt zwischen 0,1 % und 1 %. In diesem Zusammenhang soll nochmals das Dip-Meter erwähnt werden; das Verfahren wurde bereits beschrieben. Man kann eine Umschaltung vornehmen, wobei die Anordnung als Wellenmesser oder als Oszillator arbeitet. Im letzteren Fall ist die Genauigkeit geringer, da die Konstanz des Oszillators noch durch die Ankopplung des Meßobjekts beeinflußt wird.

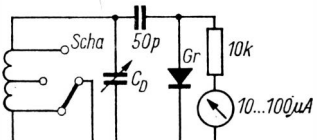


Bild 56
Prinzipschaltung des Wellenmessers

17.6. Frequenzmessung mit der Meßleitung

Unbekannte Frequenzen im dm-Gebiet oder ähnlichen (70 cm) kann man mit der Meßleitung bestimmen. Am besten eignet sich dazu die unsymmetrische Meßleitung ($Z = 50\,\Omega$ bis $70\,\Omega$). Dabei koppelt man die Leitung beim Meßvorgang lose an den Sender an. Der Meßkopf muß die erforderliche Empfindlichkeit haben. Wenn die Leitung nicht abgeschlossen ist, erhält man nun auf dieser stehende Wellen. Zum Messen benutzt man die auftretenden Minima, weil die Flanken zum Minimum steiler als beim Maximum sind. Es werden die Abstände zweier Minima gemessen; das entspricht der halben Wellenlänge. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Längenmessung benutzt man die gleichen Ausschläge am Instrument des Meßkopfes links und rechts vom Minimum, addiert beide Längen und dividiert durch zwei (die Summe). Sehr oft ist ein Nonius vorgesehen. Für die Frequenz ergibt sich:

$$f = \frac{2v}{\lambda} \cdot \tag{59}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen auf einer Leitung ist:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}\ ; \tag{60}$$

$c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s, ε_r — relative Dielektrizitätskonstante, μ_r — relative Permeabilität, f in Hz, λ in cm.

Im Fall der Meßleitung setzt man $\varepsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$; damit ist $v = c$. Die Meßgenauigkeit liegt bei 1%.

17.7. Frequenzmessung mit dem Interferenzwellenmesser

Auf Grund der Festlegungen in der Amateurfunkordnung darf die Senderfrequenz einen Fehler haben, der $= 10^{-3}$ ist.

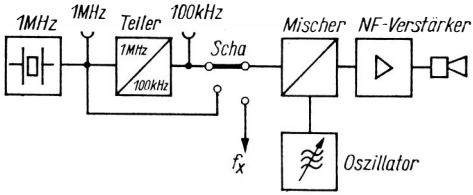


Bild 57 Übersichtsschaltplan des Interferenzwellenmessers

Man kann deshalb die Senderfrequenz nur mit einem Gerät überprüfen, das einen wenigstens um eine Größenordnung geringeren relativen Fehler hat. Eine exakt aufgebaute Quarzstufe ohne Thermostat erfüllt die Bedingung der geforderten Konstanz. Des weiteren ist ein ebenfalls exakt aufgebauter freischwingender Oszillator in seiner Frequenz von der Quarzstufe zu überprüfen. Der Oszillator läßt sich durchstimmen und ist mit einer Skale versehen. Die Frequenz der Quarzstufe wird so gewählt, daß diese mehrfach in den Frequenzbereich des Oszillators fällt. Bild 57 zeigt einen Übersichtsschaltplan, der verdeutlicht, wie die Mischung der Oszillator- und Quarzfrequenz erfolgt bzw. wie die Mischung mit der Frequenz f_x durchgeführt wird. Zum Beispiel führt man die Quarzfrequenz von 1 MHz direkt nach außen oder leitet sie einer Teilerstufe zu, die auf 100 kHz teilt. Der Mischstufe folgt ein NF-Verstärker, der den Kopfhörer speist. Es kann noch ein Anzeigeinstrument zusätzlich benutzt werden. Mit dem Absorptionswellenmesser kann man den durchstimmbaren Oszillator zunächst grob eichen. Danach wird dann durch Einpfeifen mit der Quarzstufe die endgültige Skale hergestellt. Das geschieht mit dem 1-MHz-Quarz ebenso wie mit den 100-kHz-Frequenzen. Es ist nun möglich, die Senderfrequenz zu überprüfen oder beispielsweise die Skale eines Empfängers zu kontrollieren. Es läßt sich auch ein Wellenmesser mit einem größeren Frequenzbereich herstellen. Dabei ist zu beachten, daß keine Störungen (BCI, TVI) auftreten. Für jeden Funkamateur ist es Pflicht, einen Interferenzwellenmesser im Bereich von 3500 kHz bis 3800 kHz zu besitzen, damit er alle Bänder in der

Frequenzgenauigkeit überprüfen kann. Die Kontrolle geschieht mit der Grund- und Oberwelle. Durch die 100-kHz-Eichpunkte (deren Oberwellen bis in den Bereich des Wellenmessers gehen) können die Bandgrenzen mit Quarzgenauigkeit überprüft werden.

18. Literaturhinweise

[1] TGL 16026: Meßwerke, Meßinstrumente
[2] TGL 16050: Meßgeräte
[3] TGL 19472: Elektrische Meßinstrumente
[4] *Benz, F.:* Meßtechnik für Funkingenieure, Springer Verlag, Wien 1952
[5] *Binder, L.:* Grundlagen, Praktische Elektrotechnik (Lehrbriefe), Verlag Technik, Berlin 1953
[6] *Diefenbach, W.:* NF-Frequenzmesser bei 300 kHz, Funk-Technik, Berlin 9/1969
[7] *Frühauf, H.:* Schwachstrom-Meßtechnik (Lehrbriefe), Verlag Technik, Berlin 1956
[8] *Greif, H.:* Messen, Steuern, Regeln für den Amateur, Militärverlag der DDR, Berlin 1973
[9] *Koch, E.:* Reflektometer „HM102" ..., Funk-Technik, Berlin 19/71
[10] *Kronjäger, O.:* Amateurtechnik
[11] *Rose, G.:* Beilage zur Funk-Technik, Funk-Technik, Berlin 1958
[12] *Rothammel, K.:* Antennenbuch, Deutscher Militärverlag, Berlin 1966
[13] *Rückert, H. F.:* Ich fahre 800 W PEP, Funk-Technik, Berlin 1/72
[14] ...: Elektromeßtechnik, Verlag Siemens Aktiengesellschaft
[15] *Schönfeld, H.:* Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik, S. Hirzel Verlag, Leipzig 1952
[16] *Stanek, J.:* Elektrische Meßtechnik (Lehrbriefe), Verlag Technik, Berlin 1957
[17] ...: Kapazität von Elektrolytkondensatoren Funk-Technik, Berlin 12/50